

文章编号: 1672-8785(2015)09-0006-04

非球面镜补偿器的支撑结构设计

袁 涛

(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: 为了折叠光路、减小系统像差, 空间遥感器的光学系统经常需要使用非球面镜。在非球面镜的光学检测中, 补偿器的支撑结构是不可缺少的设备。在定义补偿器的自由度和坐标系的基础上, 结合补偿器在非球面镜检测光路中的位置和作用, 分析了调节补偿器需要的自由度。基于自由度分析结果, 确定了支撑结构应实现的功能和结构形式。论述了一种支撑结构的结构设计, 并给出了该支撑结构的调节精度分析结果。分析结果表明, 该支撑结构的位移调节精度为 $1.4 \mu\text{m}/\text{deg}$, 角度调节精度为 $0.007 \mu\text{rad}/\text{deg}$ 。实际的工程应用表明, 该支撑结构能满足使用要求。

关键词: 补偿器; 非球面镜; 支撑结构; 光学检测; 自由度

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.09.002

Design of Supporting Structure for Compensator of Aspheric Mirror

YUAN Tao

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

Abstract: To reduce aberration, aspheric mirrors are usually used to fold the optical path in an optical system for a space remote sensor. In the optical detection of aspheric mirrors, the supporting structure is necessary for a compensator. On the basis of the definition of degree of freedom and coordination of the compensator, the degree of freedom required to adjust the compensator is analyzed by incorporating the position and function of the compensator in the detection optical path. According to the analysis result, the function and structure form which should be achieved for the compensator are confirmed. A supporting structure is designed and the analysis result of the adjusting precision of the supporting structure is given. The analysis result shows that the supporting structure has its displacement adjusting precision of $1.49 \mu\text{m}/\text{deg}$ and angle adjusting precision of $0.007 \mu\text{rad}/\text{deg}$. The actual engineering application affirms that the supporting structure satisfies the requirements for use.

Key words: compensator, aspheric mirror, supporting structure, optical detection, degree of freedom (DOF)

收稿日期: 2015-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60538020)

作者简介: 袁涛 (1980-), 男, 安徽阜阳人, 博士, 副研究员, 从事空间光学遥感器的结构设计和动力学减震研究。

E-mail: ytcy426@sohu.com

0 引言

近些年来,大视场、长焦距^[1]光学遥感器得到了快速发展。该类光学遥感器的光学系统^[2]经常使用非球面镜来达到折叠光路、减小系统像差的目的。因此,非球面镜的相关技术对于这类光学遥感器的研制非常重要。

非球面镜的设计^[3]、加工^[4]、改性^[5]、镀膜^[6]、检测^[7]以及支撑^[8]等技术都是与非球面镜相关的技术。其中,非球面镜的检测技术是确保非球面镜的光学加工达到设计要求的关键控制手段。

非球面镜的检测方法有多种可以选择,其中补偿器检测法^[9]应用广泛而且可靠。补偿器检测原理是利用补偿器把平面或球面波转换为参考非球面波,使之与被检验非球面的理论形状相吻合。在进行实际的检测操作时,要求补偿器的光轴与非球面镜的光轴重合,因此实现该要求就需要对补偿器的空间位置进行调节,也就需要研制补偿器的支撑结构。

本文在分析补偿器的调节自由度的基础上,确定了支撑结构应实现的功能,详细阐述了支撑结构的设计,最后对调节精度进行了分析,并给出了结论。

1 补偿器的自由度

根据自由度理论,三维空间的物体有6个自由度,即3个平动自由度和3个转动自由度。对于补偿器,其6个自由度为平动自由度 X_P 、 Y_P 、 Z_P 和转动自由度 X_R 、 Y_R 、 Z_R ,如图1所示。坐标系的原点在补偿器的光轴上,坐标轴 Z_P 与补偿器的光轴重合。另外,补偿器是关于 Z_P 旋转对称的光机结构。

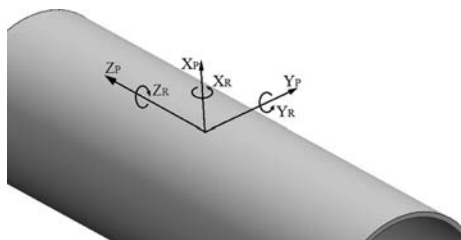


图1 补偿器的自由度

2 非球面镜检测光学系统

在进行面型检测时,非球面镜的光学系统由干涉仪、补偿器和非球面镜组成,如图2所示。干涉仪发出的平行光,经补偿器形成高精度波前,出射到非球面镜上,然后经非球面镜反射的光再经补偿器回到干涉仪,产生干涉条纹,从而实现对非球面镜面型的检测。

当然,在对非球面镜进行面型检测时,干涉仪、补偿器和非球面镜都需要各自的支撑结构,本文仅介绍补偿器支撑结构的设计。

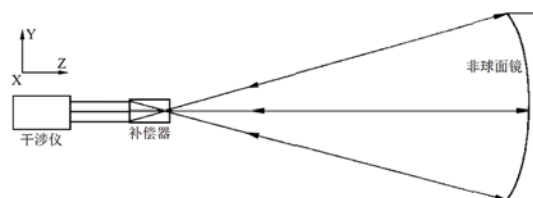


图2 非球面镜检测光学系统

3 调节自由度需求分析

非球面镜检测光学系统要求补偿器的光轴与干涉仪的光轴平行,并与非球面镜的光轴重合。一般情况下,未经调节的补偿器,其光轴与非球面镜光轴的位置关系可简化为空间几何模型—两条不相交的空间直线。而两条不相交的空间直线,需要经过两次转动和两次平移才能重合,如图3所示。补偿器光轴需要经过两个旋转自由度 Y_R 、 X_R 调节和两个平移自由度 X_P 、 Y_P 调节才能与非球面镜光轴重合。

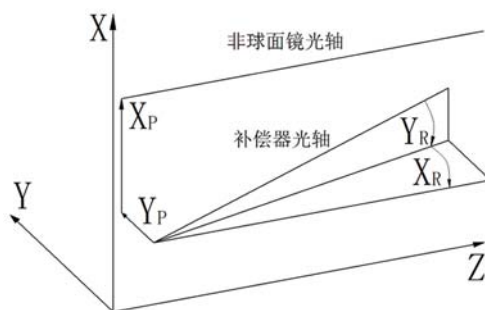


图3 补偿器的调节模型

另外,补偿器和非球面镜的相对位置也需要确定,因此需要调节平移自由度 Z_P 。由于补

偿器的光机结构是关于光轴 Z_P 轴对称的, 因此不需要对旋转自由度 Z_R 进行调节。

4 支撑结构的功能

经过对补偿器调节自由度的需求分析, 可以确定补偿器支撑结构的功能。

首先, 通过支撑结构可以调节补偿器的五个自由度: 平动自由度 X_P 、 Y_P 、 Z_P 和旋转自由度 Y_R 、 X_R 。

其次, 将补偿器调节到位后, 补偿器的位置需要保持稳定, 因此调节机构需要锁紧或自锁。

最后, 支撑结构对补偿器的调节精度应能满足使用要求, 具有工程应用价值。

5 结构形式与结构设计

补偿器支撑结构的结构形式有多种, 最常用的是 V 型块支撑结构。本文提出一种在定位板和支撑滑块结构^[10]的基础上改进的结构形式, 该支撑结构的结构形式如图 4 所示。进给模块的设计为补偿器的横向摆动调节提供了可能。

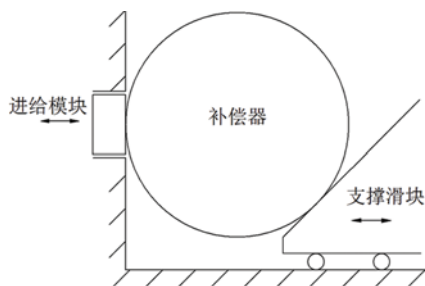


图 4 支撑结构的结构形式

5.1 结构组成

补偿器支撑结构主要由大理石座、方箱、定位板、支撑滑块、挡板、调节螺杆和进给模块等组成, 如图 5 所示。

由于非球面光学系统的特性, 以及检测便利性的需要, 补偿器的光轴与隔振平台在高度上存在一定的距离。大理石座和方箱的设计可以减小补偿器支撑结构的设计空间, 使设计变得更加紧凑。

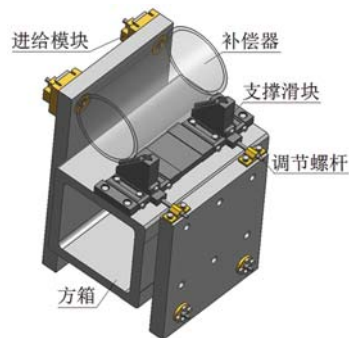


图 5 支撑结构的三维模型

5.2 材料选择

大理石具有质地均匀、性能稳定、硬度高、耐磨、不锈蚀、耐酸碱、不磁化和易清洁等特点, 能加工成高精度的基准元件, 因此选择大理石作为支撑结构基础部分的材料。

铸铁具有良好的结构稳定性、阻尼特性和低的缺口敏感性, 易于铸造、加工。这些特性非常有利于结构设计, 例如制作具有多个螺纹孔特征的结构件, 因此选择其作为支撑结构核心连接元件—方箱的材料。

黄铜 H62 具有良好的力学性能、耐磨性、切削性和自润滑性能。由 H62 螺母和 40Cr 螺杆配研的螺旋副, 可实现高精度的啮合和良好的使用性能。

6 精度分析

补偿器支撑结构的调节机构由两部分组成, 一部分是支撑滑块及其调节螺杆, 另一部分是进给模块。支撑滑块和进给模块可以分别进行调节, 也可以组合起来使用。支撑滑块和进给模块的调节精度分析模型如图 6 所示。

支撑滑块采用导程为 0.5 mm 的单头细牙螺杆进行调节。支撑滑块楔角的设计值为 45° 。当单独调节支撑滑块时, 进给量 D_{SI} 只能引起补偿器的位移 D_{SO} , 并且其位移传递符合下面的关系式:

$$D_{SO} = D_{SI} \quad (1)$$

式中, D_{SI} 为支撑滑块的位移进给量, D_{SO} 为补偿器的位移输出量。因此, 调节支撑滑块能够调节补偿器的高度 X_P 和俯仰角 Y_R 。

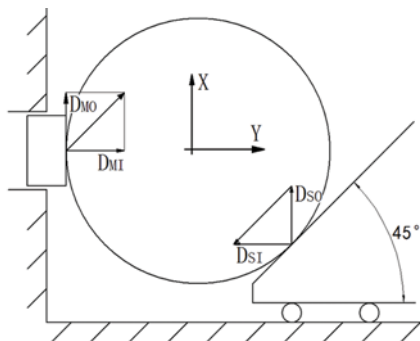


图6 调节精度分析模型

进给模块的调节采用同样的细牙螺杆实现。当单独调节进给模块时，进给量 D_{MI} 不但能引起补偿器的横向位移 D_{MI} ，而且能引起补偿器的纵向位移 D_{MO} ，并且位移传递符合下面的关系式：

$$D_{MO} = D_{MI} \quad (2)$$

式中， D_{MI} 为进给模块的位移进给量， D_{MO} 为补偿器的位移输出量。因此，进给模块能够同时调节补偿器的横向位移 Y_P 、横向摆动 X_R 和俯仰角 Y_R 。

由于进给模块能够同时调节横向摆动 X_R 和俯仰角 Y_R ，因此在调节进给模块时，需要配合支撑滑块的调整，以修正补偿器俯仰角 Y_R 。

根据两组支撑滑块在 Z_P 向的间距以及上述的位移传递关系式，可以分别获得支撑滑块和进给模块的调节精度。

支撑滑块对补偿器的高度 X_P 和俯仰角 Y_R 的调节精度分别为 $1.4 \mu\text{m}/\text{deg}$ 和 $0.007 \mu\text{rad}/\text{deg}$ 。同理，进给模块对补偿器的横向位移 Y_P 、横向摆动 X_R 和俯仰角 Y_R 的调节精度分别为 $1.4 \mu\text{m}/\text{deg}$ 、 $0.007 \mu\text{rad}/\text{deg}$ 和 $0.007 \mu\text{rad}/\text{deg}$ 。

7 结论

设计的支撑结构实现了对补偿器的多自由度调节，并具有很高的稳定性。精度分析表明，该支撑结构的位移调节精度和角度调节精度都满足使用要求。在实际应用中，使用该支撑结构完成了某空间相机非球面主镜和第三镜的光学检测，具有工程应用价值。

参考文献

- [1] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.
- [2] 薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2813-2820.
- [3] 曹兆楼. 广义非球面透镜的设计、制作及应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [4] 刘振宇, 罗霄, 邓伟杰等. 大口径非球面的组合加工 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2791-2797.
- [5] 王彤彤. 应用表面改性技术降低烧结碳化硅反射镜的表面散射 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3224-3230.
- [6] 刘晓元, 黄云, 周宁平等. 光学镀膜宽带膜厚监控系统 [J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(1): 23-27.
- [7] 李明, 罗霄, 薛栋林等. 考虑投影畸变设计大口径离轴非球面检测用计算全息图 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1246-1253.
- [8] 张丽敏, 王富国, 安其昌, 等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 438-443.
- [9] 尤锐, 王一凡, 王文革, 等. 非球面补偿器的结构设计及装调分析 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2008, 31(4): 71-73.
- [10] 袁涛, 何欣. 空间遥感器非球面光学系统补偿器调整装置设计 [J]. 红外, 2012, 33(10): 7-10.