

文章编号:1002-2082(2018)06-0791-05

椭球面反射镜的光轴引出方法

李 斌^{1,2}, 陈佳夷², 王海超², 陈 宗², 范龙飞², 霍腾飞²

(1. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100090; 2. 北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘 要: 椭球面镜作为反射式镜头主镜的常用类型, 准确、便利地引出其光轴, 在镜头装调过程中是必不可少的。传统的光轴引出方法主要依靠三坐标仪进行测量, 由于其角度拟合精度低、接触式测量和尺寸限制等缺陷, 已经无法满足现下的大口径光学镜头装调需求, 为此, 提出一种新型椭球面主镜光轴引出方法, 该方法通过设计一个平面球差补偿器, 搭建出椭球面镜的无相差面型检测光路, 将椭球面镜的光轴转换为补偿器的法线, 再使用经纬仪测量法线与结构基准间的角度关系, 间接地引出主镜光轴, 光轴引出精度可达 $1.4''$ 。相较于传统的光轴引出方法, 该方法具有更高的角度测量精度、非接触、无尺寸限制等优点, 适用范围更广。

关键词: 应用光学; 遥感卫星; 光轴引出; 光学装调

中图分类号: TN15; TH743

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO201839.0601005

Optical axis elicitation method for ellipsoidal mirror

Li Bin^{1,2}, Chen Jiayi², Wang Haichao², Chen Zong², Fan Longfei², Huo Tengfei²

(1. Beijing Institute of Information and Control, Beijing 100090, China;

2. Beijing Institute of Space Electromechanics, Beijing 100076, China)

Abstract: The ellipsoid is the most common type of primary mirror for the reflective lens. And it is necessary to accurately and conveniently elicit the primary mirror's optical axis in the process of lens alignment, which used as the reference axis of the whole optical system. The traditional optical axis extraction methods mainly rely on a three-coordinate instrument to perform measurement. Due to its low angle fitting precision, contact measurement, and aperture limitation, the conventional optical axis system can no longer meet the requirements of the current large-aperture optical system. To this end, a novel ellipsoidal main mirror optical axis extraction method was proposed. By designing a plane spherical aberration compensator, the non-phase difference surface detection optical path of the ellipsoidal mirror was constructed, and the optical axis of the ellipsoidal mirror was converted into the normal line of compensator, and then the theodolite was used to measure the angular relationship between the normal line and the structural reference, and the main mirror optical axis was elicited indirectly. Results show the optical axis extraction accuracy can reach $1.4''$. Compared with traditional optical axis extraction methods, the method has the advantages of higher angular measurement accuracy, non-contact, no size and wider application range, etc.

Key words: applied optics; remote sensing satellite; optical axis elicitation; optical alignment

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-05-28

基金项目: 国家重大科技专项

作者简介: 李斌(1989—), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 主要从事光学装调及系统工程方面的研究工作。

E-mail: 290162457@qq.com

引言

随着我国航天遥感卫星对地分辨率正式跨入亚 0.5 m 的时代,各类遥感器的口径也纷纷向着 1 m 甚至更大的领域发展。光学镜头的体积增大,随之而来的就是对各个光学元件之间同轴度的更高要求,因为哪怕秒级的角度偏转都会带来毫米级的位置偏差。而在整个镜头的装调过程中,主镜的光轴通常都是其他光学元件的装调基准轴,对于主镜光轴的引出精度,不仅关系到整个光学系统的成像质量,甚至还会导致光学系统与镜头结构相互干涉,无法顺利完成装配。

传统的主镜光轴引出方法主要通过三坐标仪测量镜面各点的空间坐标,通过曲面拟合得出光轴方向,确定光轴与基准面的角度关系。由于三坐标仪的测量范围有限且测量误差会随着被测物体尺寸增大而增大,以 GLOBAL 三坐标仪为例,其空间测量范围为 1 000 mm × 700 mm × 700 mm,测量精度为 $1.9 \mu\text{m} + L/333 \mu\text{m}$ (其中 L 单位为 mm)。除此之外,在曲面拟合过程中非球面的拟合计算也会带入角度误差,直径 1 m 的高次非球面镜光轴引出精度约为 $8''$,已无法满足现下的遥感器装调精度要求。而且,随着镜头分辨率要求的逐步增长,采用 1 m 以上的非球面主镜已成为遥感器镜头的常态,三坐标仪的测量范围也不再能够满足大口径镜头的装调要求。

为解决大口径反射式光学镜头主镜的光轴引出问题,鉴于共轴反射式镜头的主镜(除 R-C 系统外)多为椭球面与抛物面,文中提出一种应对椭球面镜和抛物镜的光轴引出方法。该方法采用光学检测,无需接触镜面,且光轴引出的尺寸范围只与配合平面反射镜的口径相关,无测量尺寸限制。光轴引出精度仅受单台经纬仪的测角精度和测试光路调节误差影响,不随被测镜的尺寸增大而增大。该方法被广泛应用于各类中大口径镜头的装调中,多台高分辨率遥感相机采用该方法辅助装调,不仅确保了极高的装调精度,并且极大地缩短了装调周期。

1 椭球面反射镜的光轴引出方案

以某商业遥感卫星搭载的高分相机主镜为例,相机的光学系统为同轴三反结构,其中主镜为椭球面反射镜,主镜直径为 448 mm,检测光路中

使用的干涉仪出射波长为 632.8 nm,补偿镜的玻璃材料为 K9。图 1 为采用 32 inch(81.28 cm)口径平面波干涉仪进行光轴引出的光路图,待测反射镜为某高分辨率遥感相机的主反射镜。

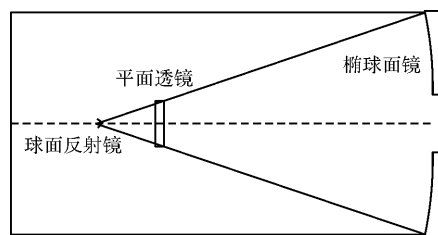


图 1 椭球面镜光轴引出的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of optical axis elicitation of ellipsoidal mirror

该光路可作为椭球面镜的无像差检测光路,光路中的各个光学元件调节到位后,平面透镜可以完全补偿椭球面镜的球差,但是根据椭球面镜的顶点曲率半径和非球面系数的不同,所采用的平面透镜厚度也将随之改变。

进行光轴引出前,预先进行平面镜设计,通常设计指标除了须确保平面透镜的面型和厚度外,还应该考虑其尺寸造成的遮拦,在一般的同轴反射式系统中,不应大于主反射镜中心孔的直径,以免造成不必要的遮拦。

此外使用大口径干涉仪进行光轴引出,还需要采购一个 F 数合适的球面反射镜:

$$F = \frac{R}{D}$$

式中: R 为球面反射镜的半径; D 为反射镜的入瞳直径。

球面反射镜的 $F/\#$ 数应小于椭球面镜的 $F/\#$ 数 F_1 :

$$F < F_1 = \frac{d}{f}$$

式中: d 为椭球平面镜的直径; f 椭球面镜的顶点曲率半径。

图 2 为主反射镜光轴引出的光路搭建示意图,测试光路的目的是将主反射镜的光轴引出至结构框的背部基准面上。干涉仪出射平行光经由椭球面镜反射后汇聚,再经平面透镜消除球差,形成椭球面镜的无像差检测光路。通过调节各个光学元件的位置消除失调量导致的像差后(观察平面透镜的条纹图,确保平面透镜法线与干涉仪出射光线平行),干涉仪的出射光线、平面

透镜的法线、椭球面镜的光轴三者之间相互平行,使用经纬仪通过主反射镜的中心孔自准直于平面透镜,得到的角度即为主反射镜的光轴角度。建立光轴与基准面之间的角度关系,即可引出主反射镜的光轴。

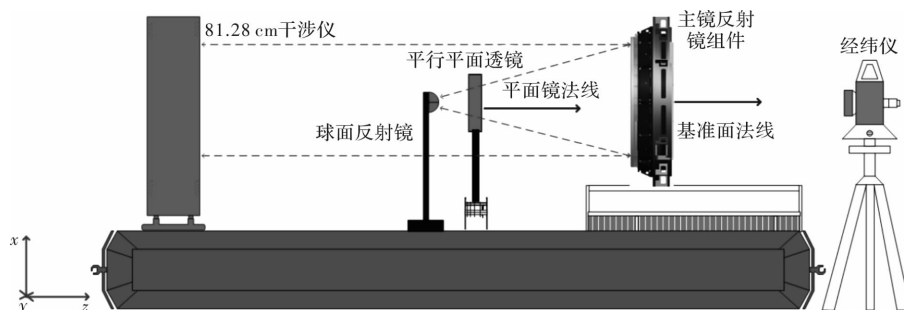


图 2 主反射镜光轴引出示意图

Fig. 2 Diagram of main reflector optical axis extraction

当被测椭球面镜的口径大于干涉仪口径时,只需更改光路走向,在球面反射镜位置放置一台小口径的球面波干涉仪(干涉仪的标准头 F 数与球面反射镜一致),再加入一块口径大于或等于椭球面镜的平面反射镜即可。为减少遮拦,平面反射镜最好有大小合适的中心孔,测试光路如图 3 所示。该光路无法通过观察干涉仪上的平面透镜条纹来确保平面透镜与平面反射镜平行,应在调节光路前采用经纬仪调节两者相互平行,后期的像差调节不再进行移动。

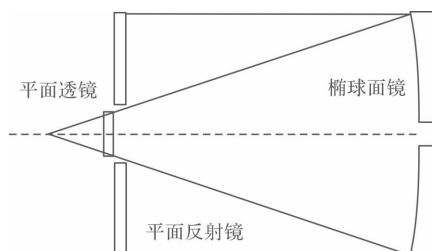


图 3 转置后的光轴引出光路图

Fig. 3 Optical path diagram of transposed optical axis elicitation

2 实验原理

椭球面反射镜的光轴引出主要基于无像差法测试光路,如果测试光路中不加补偿镜,平面波经椭球面反射后汇聚于像面,会存在数值为正的球差,该球差的计算公式为

$$N_0 = \frac{R_0}{\epsilon^2 - 1} \left[2 - (\epsilon^2 + 1) \sin^2 \frac{u'}{2} - 2 \cos \frac{u'}{2} \sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \frac{u'}{2}} \right]$$

式中: R_0 为椭球面镜的顶点曲率半径; ϵ^2 为非球面

系数; u' 为理想像面处的光线反射角。而汇聚光线经过平行平面透镜后恰恰会产生负球差,球差对应的计算公式为

$$\Delta N = -d \frac{(n^2 - 1)}{n^3} \times \frac{u'^4}{8}$$

式中: d 为平面透镜的厚度; n 为其折射率; u 为轴外光线的最大入射角等于 u' 。

根据上述两式,在确定平面透镜的材料后(n 已知),即可根据椭球面镜的波相差确定透镜的厚度 d 。以图 3 中的椭球面反射镜为例,其直径 φ 为 1 048 mm,顶点曲率半径 R 为 3 156.69 mm,非球面系数 ϵ^2 为 0.966 1。经计算得到完全补偿其球差的平面透镜厚度 d 为 36.15 mm,图 4 为补偿前后测试光路中的干涉图,左为补偿前,右为补偿后。

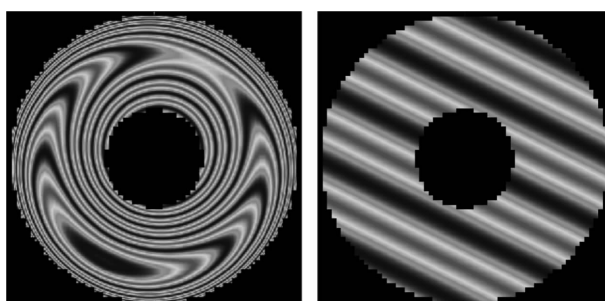


图 4 系统球差补偿前后的干涉条纹图

Fig. 4 Interference fringe pattern before and after system spherical aberration compensation

光路架设好后,使用经纬仪分别自准直于基准面和平面透镜。假设经纬仪自准于基准平面方向的空间矢量为 $\mathbf{P}(x, y, z)$,其对应的经纬仪水平角和竖直角读数分别为 H 和 V ,以经纬仪的 $(0^\circ, 90^\circ)$, $(270^\circ, 90^\circ)$ 方向分别为 $+X$ 和 $+Y$ 轴建立右

手正交坐标系,将竖直向上方向设为坐标系的 Z 轴正方向,经纬仪的零位设为 X 轴正方向,如图 5 所示,在经纬仪坐标系中 P 向量的分量可表示为

$$\begin{aligned} x &= \sin V \cos H \\ y &= -\sin V \sin H \\ z &= \cos V \end{aligned}$$

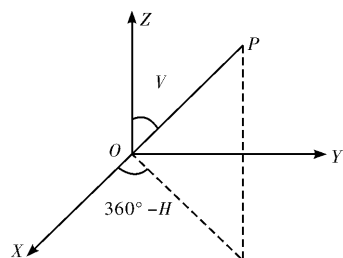


图 5 经纬仪测量标系

Fig. 5 Theodolite measurement coordinate system

同理,可以计算出经纬仪自准直于平面透镜时的向量 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 的分量,根据空间两向量的点积公式:

$$P \cdot P_0 = |P| |P_0| \cos \theta$$

式中 θ 为两向量的空间夹角,则有:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos V \cdot \cos V_0 + \sin V \cdot \sin V_0 \cdot \\ &\quad \cos(H_0 - H) \end{aligned}$$

根据上式即可计算得到两向量间的空间夹角,反复测量数次后,取平均值得出主镜与基准面的空间夹角。

3 误差分析

光轴引出过程中的主要误差来源包括经纬仪的测试误差、平面透镜的调节误差、椭球面镜的调节误差以及干涉仪的测试误差。其中经纬仪的测试误差为 δ_1 ,由于测试过程中只采用了一台经纬仪,故不存在经纬仪建站误差,测试误差 δ_1 为仪器误差 $\pm 0.5''$ 。平面透镜的调节误差 δ_2 ,主要由平面透镜无法调节至与干涉仪平行入射光或平面反射镜法线完全垂直导致,失调量与经纬仪的测试精度有关,约为 $\pm 0.5''$ 。椭球面镜的调节误差 δ_3 ,该误差主要是因测试光路通常情况难以调节至 0 彗差状态会残留一定量的彗差,36 项 Zernike 系数中的初级彗差值约为 ± 0.02 ,用光学设计软件仿真得出图 1 中椭球面镜对应的角度偏差为 $\pm 1.1''$ 。干涉仪的测试误差 δ_4 ,干涉仪本身的测量精度很高,但是由于测试环境中通常存在空气扰动、平台振动等干扰,会带来一定的数据偏差,通常干涉仪

的测量偏差导致的 Zernike 系数变化为 ± 0.01 ,该量级的初级彗差对应的角度偏差为 $\pm 0.5''$ 。

合成所有的误差因素,得到该光轴引出方法的精度 $\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = 1.4''$ 。该引出精度高于传统的三坐标拟合,且精度不随被测件的口径变化而变化。

4 实验验证

以某商业遥感卫星的椭球面主反射镜为例,该反射镜的参数如下:直径 φ 为 448 mm,顶点曲率半径 R 为 1 240.581 mm,非球面系数 ϵ^2 为 0.961。计划采用 K9 玻璃作为平面透镜的材料,经计算得出可完全补偿反射镜球差的平面透镜厚度 d 为 16.33 mm。补偿球差的测试光路如图 1 所示,光轴引出方法采用图 2 所示的光路图,通过调节反射球面镜和被测主镜的位置,将测试系统的初级彗差调节至小于 0.01 (Zernike 系数),测试结果如图 6 所示,主镜面型参数与采用补偿器检测的结果基本一致,图中的黑影是球面反射镜的支撑结构遮挡光路导致的。

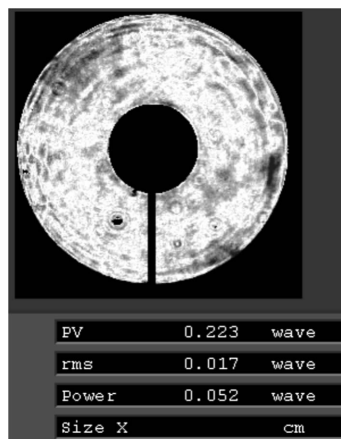


图 6 失调量校正后的测试结果

Fig. 6 Test results after correction of misalignment

光路搭建完成并将系统彗差调节到位后,依据光轴引出方案中所示,采用经纬仪分别测得平面透镜与基准面的法线方向。结果在表 1 中给出,表中 V 、 H 是经纬仪自准直于基准面时的读数, V_0 、 H_0 是干涉仪自准直于平面透镜时的读数,为排除人为操作误差,测试过程通过多次测量取平均。

根据实验原理中所述的经纬仪空间夹角的计算公式,计算得到主镜光轴相对于基准面法线的空间夹角,将多次测量计算的结果取平均值,再加上误差分析所得结果,得出 $\bar{\theta} = 57.99'' \pm 1.4''$ 。其

中绕 Z 轴的倾斜角度分量 $\overline{\theta_z}=-52.99''$,绕 Y 轴的倾斜角度分量 $\theta_y=-23.54''$,角度分量方向依据右手法则,坐标系已在图 2 中给出。

依据主镜光轴引出的结果,确定其他光学件

的粗装配位置,在后续的镜头装调过程中,很大程度上减少了次镜、三镜的失调调节量。多次同类型镜头的装调结果显示,采用该方法可以将次镜的粗装离轴量控制在 0.5 mm 以内。

表 1 测量结果
Table 1 Measurement result

角度分量	一次测量	二次测量	三次测量	四次测量	五次测量
V	90.004 3°	90.004 4°	90.004 4°	90.004 4°	90.004 6°
H	0°	0°	0°	0°	0°
V_0	89.989 8°	89.989 6°	89.989 7°	89.989 7°	89.989 7°
H_0	0.006 7°	0.006 5°	0.006 6°	0.006 4°	0.006 5°

5 结论

本文提出了一种面向椭球面镜的高精度光轴引出方法,该方法通过设计一面平行平面透镜补偿椭球面镜的球差,实现近似的无像差法检测。根据检测光路中平面透镜与椭球面镜光轴的关系,使用单台经纬仪建立光轴与基准面的关系,从而达到引出光轴的目的。该光轴引出方法相对于传统的三坐标测试法,光轴角度的测试精度不随被测镜的尺寸提升而降低,光轴角度测试误差仅为 1.4'',同时兼具非接触、无测量尺寸限制等优势,在面向直径 1 m 以上的大口径反射式镜头时,对于装调、加工等领域具有更为广泛的实用性。

参考文献:

[1] LONG Funian, GUO Xiumei, LIU Jianfeng. Technical study for testing of aspheres by using ZYGO interferometer[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(2): 231-233.
龙夫年,郭秀梅,刘剑峰. 利用 ZYGO 干涉仪进行非球面检测技术研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(2): 231-233.

[2] LI Mengjuan, LIAO Zhibo, WANG Chunyu. Analysis and control on assemblage tolerance in small-aperture high-precision refraction optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2): 277-281.
栗孟娟,廖志波,王春雨. 小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 277-281.

[3] AN Liansheng. Applied optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003: 166-169.
安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003: 166-169.

[4] YOXALL B E, WALMSLEY R, KUO H P, et al. Two-axis MEMS lens alignment system for free-space optical interconnect[J]. IEEE Journal of Se-

lected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(3): 559-565.

[5] WANG Xiaokun, WANG Lihui, ZHANG Xuejun. Testing of weak aspheric surface by real-time interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(2): 184-189.
王孝坤,王丽辉,张学军. 干涉法实时测量浅度非球面技术[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 184-189.

[6] HOU Maosheng. Study on key techniques of profile measurement for large aperture optical aspherics[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
侯茂盛. 大口径非球面表面形状测量关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

[7] TANG Jianguan, WU Fan, WU Shibin. Research on testing techniques for larger aperture aspherical surface in the fine grinding stage[J]. Optical Technique, 2001, 27(6): 509-511.
唐健冠,伍凡,吴时彬. 大口径非球面精磨表面形状检测技术研究[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 509-511.

[8] BORN M E. Principles of optics[M]. Translated by YANG Jiasun. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 240-241.
BORN M E. 光学原理[M]. 杨葭荪,译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 240-241.

[9] YUE Liqing, ZHANG Jiyou. Alignment method of axis angle and linear array parallelism for three-line array mapping camera[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2012, 33(3): 35-40.
岳丽清,张继友. 三线阵相机视轴夹角及线阵平行性装调测试[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 35-40.

[10] ZHANG Xiangming, JIANG Feng, KONG Longyang, et al. Research on optical alignment technology for Cassegrain system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(4): 526-530.
张向明,姜峰,孔龙阳,等. 卡塞格林系统光学装调技术研究[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 526-530.