

文章编号 1004-924X(2015)03-0639-06

使用高精度三坐标测量仪实现透镜定中心

杜 洋^{1*}, 高志山²

- (1. 上海卫星工程研究所, 上海 200240;
2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:传统的光学测量定中心法受限于光源、转台大小和装调误差传递性而不适用于大口径、多透镜光学系统的装调,为此本文提出了使用三坐标测量仪接触式测定透镜中心的精密机械测量法。介绍了使用三坐标测量仪测量大口径透镜中心偏的原理,即在测量透镜上表面与基准轴等距离各点坐标的基础上拟合得到透镜光轴与基准轴的夹角,从而解算出透镜的中心偏。通过大口径长焦距镜头的装调对该方法进行了检验。检验结果表明:该透镜的装调偏差为 $6.47''$,重复性误差为 $(1.16 \times 10^{-4})''$ 。该方法将光学测量变为机械测量,利于装调,可在保证装调精度的同时简化装调难度,提升装调效率,满足大口径多透镜光学系统对高精度装调的要求。

关键词:光学装校;中心偏测量;透镜定中心;光轴一致性;三坐标测量仪

中图分类号:TH706;TH72 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0639

Lens centering using high-precision three coordinate measuring machine

DU Yang^{1*}, GAO Zhi-shan²

- (1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China;
 2. School of Electronic and Photoelectric Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)
- * Corresponding author, E-mail: sky_duyang@163.com

Abstract: Due to the limits of light sources, the sizes of rotating platforms and the propagation of assembling errors, traditional methods of lens centering are not suitable for the assembly of large-aperture and multi-lens optical systems. Thus a new high-precision mechanical measurement method for lens centering was proposed based on a three Coordinate Measuring Machine (CMM). Principles and algorithms for measuring off-centering of the large aperture lens using the high-accuracy CMM were introduced. In the measurements, the angle between the optic axis of lens and the reference axis was calculated after the figure fitting of the measuring points, and then the centering of deviation was calculated. The method was verified by the assembling of a long focal length and large aperture imaging system. The assembling result shows that the lens off-centering is $6.47''$ and the repeatability error is $(1.16 \times 10^{-4})''$. As changing the optical measurement into a mechanical measurement, this proposed method ensures the accuracy, reduces the difficulty and improves the efficiency of lens assembly. It is able to be applied to the high-precision assembly of large aperture transmitting optical systems.

收稿日期:2014-07-08;修订日期:2014-09-04.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2014CB744200);国家自然科学基金资助项目 (No. 60977008, No. 61377015);中国科学院重点实验室开放基金资助项目 (No. 2008DP173445)

Key words: optical assembly; off-centering measurement; lens centering; coaxiality; three Coordinate Measuring Machine(CMM)

1 引言

近年来,随着航天航空观测等领域的高速发展,人们对探测系统提出了更高的要求。用于探测的光学系统的空间分辨率、光谱分辨率等愈来愈高,焦距愈来愈长,口径也愈来愈大,工作波段覆盖可见光到红外,从而使光学系统愈来愈复杂^[1]。这些复杂光学系统的研制与光学元件、光电探测器件的装调技术有着极为密切的关系^[2-4]。

传统的光学装调方法利用光学成像进行透镜的偏心检测,并且随着激光技术、光学干涉技术的发展,衍生出多种中心偏测量仪器,如激光定心仪、内调焦定心仪、光电定心仪、中心偏测量仪、点光源望远镜^[5-6]等。以光学成像方式测量透镜的中心偏时,光被聚焦至待测透镜面的球心位置,观测经反射形成的球心像,旋转测试平台带动光学系统转动,可观测到球心像的运动轨迹;读出运动轨迹,结合成像公式即可反推算出该待测面的中心偏;利用测得的中心偏,可逆向指引系统的装校工作^[7-10]。该方法对中心偏测量仪的光源、待装调光学系统的口径及透镜的数量均有限制,较为适用于装校中小口径、透镜较少的光学系统。此外,中心偏测量仪价格昂贵,工作波长多为可见光波段,因此不适用于检测非可见光波段高分辨率镜头的中心偏。目前,随着装调精度的日益提高,在逐步逼近最优状态中,装调周期越来越长^[11-13],因此基于光学成像的传统装调方法无法实现高效装调。

本文提出了一种高精度机械测量透镜中心偏的方法,可有效提升光学系统的装校效率。该方法通过在待测透镜表面上取点测量,拟合待测面的倾斜程度,从而解算透镜的中心偏。透镜的面型不同,其中心偏的解算关系也有所不同,本文以双凸透镜中心偏测量为例进行了计算。

2 三坐标测量仪定中心原理

2.1 三坐标测量仪

三坐标测量仪是一台点接触式高精度多功能

测量仪器。被测件放置于仪器工作平台上,在建立三维坐标系后,即可用测量头进行打点测试,并通过显示终端读取测试点坐标。基于单点测量原理,三坐标测试仪通过两点测试获取两点间的距离、多点测试获取被测件的形貌,进而测定待测对象的平面度、平行度、垂直度、同心度、圆柱度等参数。

使用三坐标测量仪辅助装调光学透镜时,仪器测量头与待测镜面为点接触,两者不存在运动,可降低镜面损伤。另外三坐标测量仪提供程序控制模式,操作者可通过设计安全移动路径,避免测量头在镜面上运动而产生损伤。

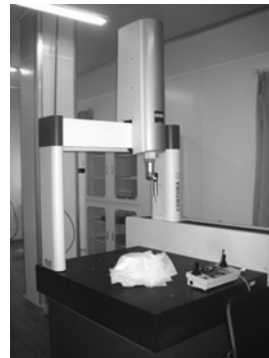


图 1 三坐标测量仪

Fig. 1 Coordinate measuring machine

在某长焦距镜头装调过程中使用的中型三坐标测量仪如图 1 所示。该三坐标测量仪为德国 Zeiss 公司生产的 CONTURA G2 系列产品之一,其工作台面大小为 $1.2\text{ m} \times 1\text{ m}$,测量臂伸长量为 600 mm 。根据测试场合不同可以选用不同长度和特殊形状的测量头。

2.2 透镜定中心原理

建立三维坐标系时,镜筒的基准端面与三坐标测量仪的工作台面接触,构成 $x-y$ 平面;通过对镜筒内壁进行多点测试,获取镜筒中心轴,作为系统装调的基准轴,从而完成 z 轴的建立。坐标原点为 O ,位于 z 轴与 $x-y$ 平面的交点。

如图 2 所示,透镜下表面球心 C_1 、顶点 S_1 、半径 r_1 为 C_1S_1 ;上表面球心 C_2 、顶点 S_2 、半径 r_2 为 C_2S_2 ;透镜光轴为直线 C_1C_2 ; S_1S_2 为透镜中心厚度 t 。

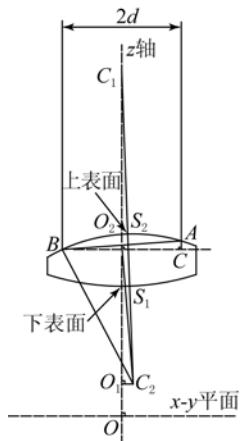


图 2 透镜定中心原理

Fig. 2 Principle of lens centering

在装调过程中,镜筒垂直于工作台面放置。在自重影响下,透镜下表面的球心 C_1 将位于镜筒的中心轴 z 轴上,调整透镜位置不会对下表面球心位置产生影响。透镜中心偏为多种因素共同作用的结果,具体表现为透镜光轴与基准轴不重合。

当存在中心偏时,透镜光轴与基准轴的偏心差 c 等于透镜上表面球心 C_2 偏离 z 轴的距离,即点 C_2 到 z 轴的垂直距离;偏心角 γ 对应图 2 中 $\angle O_1 C_1 C_2$ 。偏心差 c 与偏心角 γ 的关系为 $c = C_1 C_2 \cdot \sin \gamma$,式中 $C_1 C_2 = r_1 + r_2 - t$ 。

使用三坐标测量仪对透镜上表面进行打点测试。仅考虑 x 坐标和 y 坐标时,选取的各测量点以 z 轴为中心呈等距离分布,构成直径为 $2d$ 的圆,如图 3 所示。

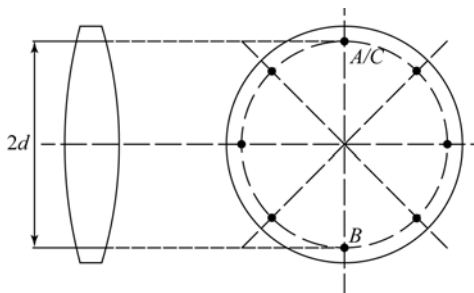


图 3 透镜表面测试点

Fig. 3 Test points on lens surface

在某长焦距镜头的设计中,为每片透镜设置 8 个用于安装紧定螺钉的螺孔。选取 8 个测量点与 8 个螺孔对应,在准确定位最高测量点和最低测量点后,可直接调整对应的紧定螺钉,实现透镜位置的调整。

各采样点组成的空间曲线为圆柱面与平面的交线,具体为:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = d^2 \\ z = ax + by + k \end{cases} \quad (1)$$

从三坐标测量仪的控制终端界面上读取各测试点的坐标,再通过数值拟合解算式(1)中的 a, b, k 。

图 2 和图 3 中,点 A 对应空间曲线上的 z 坐标最大值点,点 B 对应 z 坐标最小值点,AB 与 z 轴相交于点 O_2 。点 C 为点 A 在过点 B 与 $x-y$ 平面平行的平面上的投影,由此可知 AC 为点 A 和点 B 的 z 坐标值之差,BC 等于测量半径 $2d$ 。

由于点 A 和 B 并不一定位于采样点中,需通过拟合获取 AC,即 Δz 。

通过三角代换,令 $x = d \cos \theta, y = d \sin \theta$,并令 $a = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos \alpha, b = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin \alpha$,整理可得:

$$z = d \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos(\theta - \alpha) + k \quad (2)$$

而 $\Delta z = AC$,从而可得:

$$\Delta z = 2d \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3)$$

依据正弦定理,在 $\triangle O_2 C_1 C_2$ 中有:

$$\frac{\sin \angle O_1 C_1 C_2}{O_2 C_2} = \frac{\sin(\pi - \angle O_1 O_2 C_2)}{C_1 C_2} \quad (4)$$

通过三角关系替换式(4)中各参数进行整理,由于偏心角 γ 一般为角分量级,可认为 $\gamma \approx \sin \gamma$,可得:

$$\gamma = \frac{\Delta z}{r_1 + r_2 - t} \cdot \sqrt{\frac{r_2^2}{(\Delta z)^2 + 4d^2} - \frac{1}{4}} \quad (5)$$

偏心差 c 可由以下关系式解算:

$$c = O_1 C_2 = \Delta z \cdot \sqrt{\frac{r_2^2}{(\Delta z)^2 + 4d^2} - \frac{1}{4}} \quad (6)$$

将计算得到的偏心差与中心偏设计公差对比,若不满足公差要求,则根据两者差值及测试点的最高点与最低点位置,指引透镜紧定螺钉的调节,实现透镜位置微调,再重新测量透镜中心偏。重复上述过程,直至满足设计要求,完成透镜装调。

2.3 数据处理方法

通过三坐标测量仪可获取透镜上表面测量点的坐标集合 (x_i, y_i, z_i) ,其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。采用最小二乘法拟合空间平面 $z = ax + by + k$,拟合时

需使得 $S = \sum_{i=1}^n (ax + by + k - z)^2$ 最小,即:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = \sum 2(ax_i + by_i + k - z_i)x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = \sum 2(ax_i + by_i + k - z_i)y_i = 0, \quad (7) \\ \frac{\partial S}{\partial k} = \sum 2(ax_i + by_i + k - z_i) = 0 \end{cases}$$

整理得:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{bmatrix}. \quad (8)$$

通过求解上述方程,即可得到 a, b, k ;再计算偏心角 γ 和偏心差 c ,即可解算对应透镜的装调偏差。

3 系统装调验证

3.1 某长焦距镜头中心偏测量

某长焦距镜头的焦距为 15 m,出瞳直径为 130 mm,视场角为 $6^\circ \times 6^\circ$,工作中心波长为 777.4 nm,光学设计结构如图 4 所示。该光学系统由 10 片透镜组成,最大口径达 165 mm。

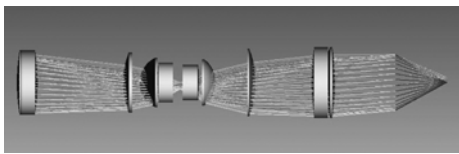


图 4 某大口径长焦距镜头的光学设计图

Fig. 4 Optical design of a large aperture and long focal length imaging system

其中,某透镜的上表面半径为 491.7 mm,下表面半径为 191.7 mm,透镜中心厚度为 30.2 mm。该透镜的机械镜筒及装调测试如图 5 所示。

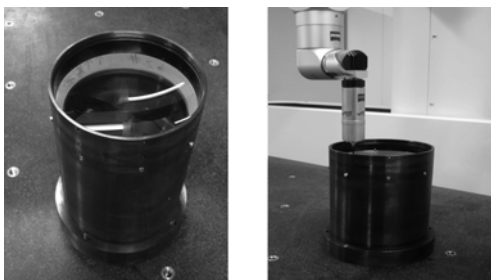


图 5 某透镜中心偏测试图

Fig. 5 Test of lens centering

在该透镜的装校过程中,与每片透镜的紧定螺钉个数相对应选定 8 个采样点,设定采样半径为 68 mm,测试数据如表 1 所示。

表 1 透镜中心偏测试数据

Tab. 1 Measuring data from lens centering test

(mm)

序号	x	y	d	z
1	-0.006	68.005	68.005	292.473
2	-0.008	-68.003	68.003	292.477
3	-68.004	0.004	68.004	292.478
4	68.005	0.005	68.005	292.473
5	48.104	48.066	68.003	292.472
6	-48.092	-48.082	68.005	292.477
7	-48.086	48.087	68.004	292.475
8	48.085	-48.089	68.005	292.477

3.2 数据处理与分析

利用 Matlab 软件编程,对实测点数据进行最小二乘法拟合,得到:

$$a = -2.618 \times 10^{-5}, b = -3.290 \times 10^{-5}, k = 292.475.$$

拟合得到的空间平面 $z = ax + by + k$ 与测量点关系如图 6 所示。测量半径 d 的均值为 68.004 mm,可解得 $\Delta z = 5.7187 \times 10^{-3}$ mm。

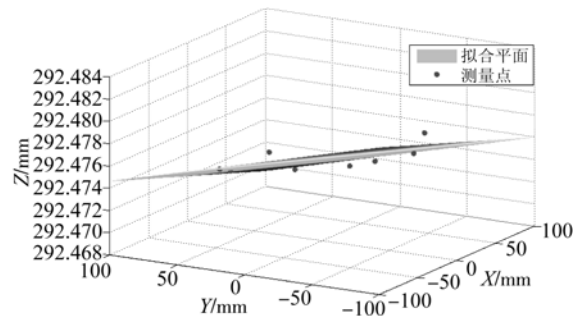


图 6 拟合平面与测量点

Fig. 6 Fitting flat surface and measuring points

根据该透镜参数解算对应的透镜偏心角 $\gamma = 3.135 \times 10^{-5}$ rad,即 $6.47''$ 。对应的偏心差 c 距离为 0.020 5 mm。

装调过程中共测量 8 个点,相当于对空间平面进行了 56 次测量,通过解算,透镜偏心角 γ 的重复性误差为 $1.16 \times 10^{-4}''$ 。

在镜头设计中,要求该透镜的装调中心偏小于 $10''$,实际装调偏差为 $6.47''$,满足装调要求。

4 结 论

本文基于高精度三坐标测量仪提出了一种定透镜中心光学系统装调方法。与传统的光学中心偏测量仪相比,该方法将光学测量变为机械测量,利于装调;无需使用光源,降低了装调难度;具有大工作台面,利于大口径光学系统装调;系统光轴为镜筒中心轴,各透镜均以此轴为基准单独装调,

避免了传统光学装调中由于成像作用带来的装调误差传递。

利用所提方法对双凸透镜进行了装调,结果显示实际装调偏差为 $6.47''$,满足 $10''$ 的装调要求。该方法在保持高装调精度的同时,兼具装调的简易性、高效性,可应用于大口径、多透镜的光学系统装调中。但针对不同类型的透镜,装调时偏心角和偏心差的计算式略有变化,这将在后续工作中进行测试和研究。

参考文献:

- [1] 曲贺盟,张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计 [J]. 中国光学, 2014, 7(4): 622-630.
QU H M, ZHANG X. Design of athermalized infrared optical system with high-speed switching and compact dual-FOV [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 622-630. (in Chinese)
- [2] 高志良. 高光谱成像仪等效焦面装调模组设计 [J]. 中国光学, 2014, 7(4): 644-650.
GAO ZH L. Design of hyperspectral imager equivalent focal plane assembling module [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 644-650. (in Chinese)
- [3] 孙敬伟,陈涛,王建立,等. 主次镜系统的计算机辅助装调 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2156-2163.
SUN J W, CHEN T, WANG J L, *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2156-2163. (in Chinese)
- [4] 魏全忠. 高性能光学系统定中心研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
WEI Q ZH. *Research on lens centering of high-performance optical system* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003. (in Chinese)
- [5] ROBERT E P. Lens centering using the point source microscope [J]. *SPIE*, 2007, 6676, 667603: 1-10.
- [6] ROBERT E P. Conjugate selection for precision lens centering [J]. *SPIE*, 2010, 7793, 779304: 1-6.
- [7] 魏全忠,蒋世磊,马天梦,等. 大口径精密投影光刻制版镜头的光学装校 [J]. 光学技术, 2001, 27(6): 493-498.
WEI Q ZH, JIANG SH L, MA T M, *et al.*. Optical assembly and rectification of big aperture's precision photo-lithographic plate-making lenses [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6): 493-498. (in Chinese)
- [8] 郭夏锐,廖志波,王春雨,等. 光轴一致性误差对空间透射式系统像差和质量的影响 [J]. 红外与激光工程, 2012, 4(12): 436-441.
GUO X R, LIAO ZH B, WANG CH Y, *et al.*. Aberration and alignment quality investigation of space transmission optical system with centering error of optical axis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 4(12): 436-441. (in Chinese)
- [9] 王铁印,王红,谷凤安,等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2692-2698.
WANG T Y, WANG H, GU F A, *et al.*. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2692-2698. (in Chinese)
- [10] 苗健宇,张立平,吴清文,等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1648-1653.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W, *et al.*. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1648-1653. (in Chinese)
- [11] 樊学武,陈荣利,马臻,等. 偏心和倾斜光学系统初级像差理论的研究 [J]. 光子学报, 2004, 33(4): 494-496.
FAN X W, CHENG R L, MA ZH, *et al.*. Study on the primary aberration theory of decentered and tilted optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(4): 494-496. (in Chinese)
- [12] 程子清,罗劲峰,胡际先,等. 光学传递函数仪在红外光学系统装调中的应用 [J]. 光学仪器, 2007, 29(3): 9-13.
CHENG Z Q, LUO J F, HU J X, *et al.*. Appli-

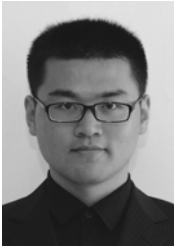
cation of OTF instrument in the alignment of IR optical system [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29 (3):9-13. (in Chinese)

- [13] 杨新军,王肇圻,母国光,等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性 [J]. *光子学报*, 2005, 34 (11):

1658-1662.

YANG X J, WANG ZH Q, MU G G, *et al.*. Aberration properties of the decentered and tilted optical systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11):1658-1662. (in Chinese)

作者简介:



杜 洋(1988—),男,江苏徐州人,硕士,2010年,2013年于南京理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学系统设计、光学精密装调等方面的研究。E-mail:sky_duyang@163.com

导师简介:



高志山(1966—),男,江苏涟水人,博士,教授,博士生导师,1989年于哈尔滨科学技术大学(现哈尔滨理工大学)获得学士学位,1992年于中国科学院长春光机所获得硕士学位,1999年于南京理工大学获得博士学位,主要从事光学测试、光学设计和眼视光学等方面的研究。E-mail:zhishgao@mail.njust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)