

基于一体化轴系的消像旋组件设计

高世林, 赵晓敏, 刘京生, 刘宏旭, 温庆荣, 杨加强

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:介绍了一种基于一体化轴系设计的棱镜消像旋组件,以及光学装调方法。该组件可用于机载光电雷达、车载周视瞄准仪等光学系统中,解决了光学系统像方图像旋转的问题。该组件采用一体化轴系设计,即在主轴上直接加工出轴承内圈沟道;主轴、滚珠、保持架与轴承外圈一体化装配。同时棱镜组件可以在主轴内实现一维调整,以确保棱镜视轴与机械轴的重合。通过本文所介绍的光学装调方法,可以使消像旋组件棱镜的光轴回转精度达到 $\pm 12''$ 。相对于其他消像旋组件的轴系设计,具有精度高、稳定性强、体积小、质量轻、结构简单、易于装调等特点。

关键词:一体化轴系消像旋光轴回转精度

中图分类号:TH133.33

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.01.015

The design of elimination image rotation subassembly based on integrated shafting

GAO Shi-lin, ZHAO Xiao-min, LIU Jing-sheng, LIU Hong-xu, WEN Qing-rong, YANG Jia-qiang

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: A kind of elimination image rotation subassembly based on integrated shafting design, and its optical alignment method are described in the paper. This subassembly can apply to airborne photoelectricity radar, vehicle-borne panoramic sighting telescope and other optical system, and solves the problem of optical system image rotation. The subassembly uses integrated shafting design, that is, the bearing inner ring channel is machined directly on the main shaft, and the main shaft, bearing balls, and bearing outer ring and cage are integrated assembly. At the same time, the prism components can be adjusted in the main shaft on one-dimensional direction, which can overlap prism optical axis and mechanical axis. It can make the optical axis rotation precision of elimination image rotation subassembly prism achieving $\pm 12''$ through the alignment method introduced in this article. Compared with other elimination image rotation systems, it has characteristics of high precision, strong stability, small volume, light weight, simple structure and easy to align.

Keywords: integrated shafting; elimination image rotation; optical axis rotation precision

1 引言

周视光学系统可以在方位方向进行 360° 扫描、跟踪成像,在军事领域有广泛应用,可以用作光电雷达,也可用作火控瞄准器。如果周视光学系统比较

复杂,整个系统无法随方位和俯仰组件旋转,只有前端部分系统可以随方位和俯仰组件旋转,而后方成像部分需要与转台的基座固连,在这种情况下图像就会在视场中绕光轴旋转^[1]。

为了消除像旋,得到稳定的图像输出,系统中就需要引入消像旋组件用作间接稳定装置。在系统光路中,成像器件之前,沿主光轴方向安装一个消像旋棱镜。根据光学原理,棱镜的旋转角度为图像旋转角度的二分之一时,可实现消除图像旋转的功能。消像旋组件可以使用别汉棱镜或者道威棱镜。消像旋组件的关键在于如何使棱镜在旋转的时候,光轴具有较高的回转精度,使整个光学系统可以输出稳定的图像。同时,为满足不同的使用环境,消像旋组件还应具有稳定性强、体积小、重量轻、结构简单、易于装调等特点。

2 结构设计

在某型机载远程光电搜索跟踪系统的设计中,要求消像旋组件的光轴回转精度为 $\pm 15''$,且能满足机载环境下的高低温与振动要求。同时也要求具备较小的体积和较轻的质量。

2.1 结构组成

根据系统指标要求,决定采用一体化轴系的设计思路,具体结构设计如图 1 所示:消像旋组件主要由一体化主轴、外壳、压圈、棱镜组件、电机、码盘和读数头组成。

轴系采用了背对背成对角接触球轴承的轴系布局形式^[2],即直接在主轴上加工出轴承内圈沟道。主轴、滚珠、保持架与轴承外圈一体化装配,构成一体化主轴。一体化主轴安装在外框架内部,轴承外圈与外框架采用过渡配合。压圈通过外框架的内螺纹旋入,与轴承外圈接触,并对一体化主轴施加适当的预紧力^[3]。预紧力可以使轴承消除游隙,提高轴系精度,并同时增加轴系的刚度,提高稳定性,但过大的预紧力又会使轴系的摩擦力矩增大,导致轴系在低温工作时抱死。因此就需要通过调节压圈的松紧度来调节轴承预紧力,使得轴系在较高的回转精度与较小的摩擦力矩之间达到平衡,必要时可以通过高低温试验来验证轴系的转动特性。最后在螺纹上涂抹硅橡胶固化预紧力状态。

棱镜采用胶接与机械压紧相结合的方式固定在棱镜座内^[4],棱镜座安装到主轴的方孔内,棱镜座与主轴的安装接口采用腰型孔加定位销的方式连接,棱镜组件可以绕销钉轴线微量转动,从而实现棱镜视轴与消像旋组件机械轴的一维调整。结构如图 2 所示。

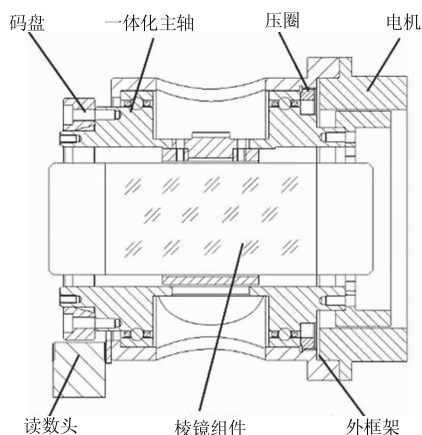


图 1 消像旋组件

Fig. 1 Elimination image rotation subassembly

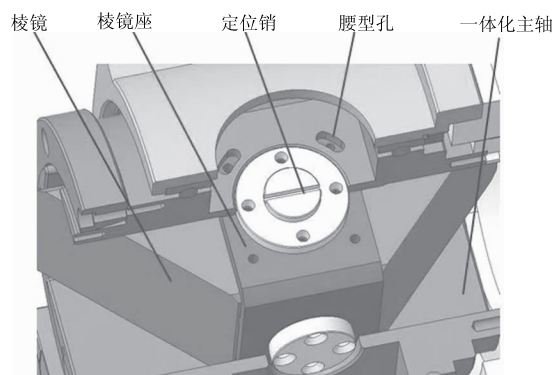


图 2 调整机构

Fig. 2 Adjusting mechanism

一体化主轴采用 GCr15 轴承钢,外壳、压圈与棱镜座采用 7075 超硬铝。光学采用道威棱镜,材料为 ZnSe,可透可见光。

驱动方式采用交流无刷力矩电机直驱,反馈控制方式采用码盘和读数头,可以使棱镜具有较高的旋转角度精度和响应速度^[5]。

2.2 设计优点

1) 可以消除零件加工误差(轴承内圈和主轴与轴承配合面的加工误差)以及装配误差(轴承内径与主轴、轴承端面与轴肩和轴承外径与外框架内径的装配误差),大幅度提高轴系的回转精度,从而提高光轴的回转精度。

2) 两列角接触球轴承采用背对背布置方式,使轴承既可以承受径向载荷,也可以承受轴向载荷,而且两列轴承的受力点在两列轴承的外侧,可以提高轴系刚度,从而增强轴系的稳定性。

3) 省去主轴的轴肩,轴承的内圈以及内压圈等结构,可以使组件的轴向尺寸减少 10 mm,径向尺寸减少 5 mm,重量减少 10 % 左右。

3 装调工艺设计

消像旋组件光学系统共有三个轴:外部主光轴、机械轴、棱镜视轴,装调的目的就是要将三轴调重合。

搭建起如图3所示的光学装调平台,自准直仪1作为外部主光轴(基准光轴)。先将消像旋组件与自准直仪1自准,也就是将机械轴与外部主光轴调重合。在消像旋组件靠近自准直仪1一侧安装二维可调节的平面反射镜,转动消像旋组件,在自准直仪1中观察靶标画圆情况。调节自准直仪1方位俯仰角度,将画圆轨迹调到十字靶标中心,并调节平面反射镜方位俯仰角度将画圆直径调到最小。记录自准直仪1靶标轨迹的度数,检测出轴系的回转精度。

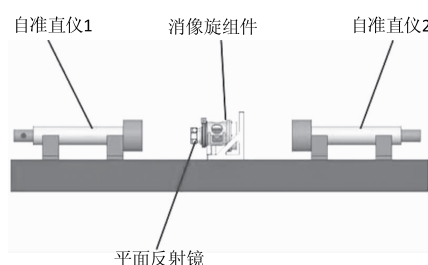


图3 装调原理

Fig.3 Alignment principle

然后拆下平面反射镜,让自准直仪1发出的光穿过棱镜。转动消像旋组件,在自准直仪2上观察自准直仪光标的画圆轨迹。调节棱镜组件上面的一维调整机构,将自准直仪2上靶标的画圆轨迹调节到最小,也就是将棱镜的视轴与外部主光轴调重合。调节自准直仪2方位俯仰角度,使得靶标接近自准直仪2的十字叉零位。记录自准直仪2靶标轨迹的读数,检测出光轴的回转误差。

4 精度分析

4.1 轴系误差分析

采用一体化轴系设计方案,可以有效的解决机械轴系回转精度误差与零部件加工误差的关联性,使得轴系误差只取决于主轴沟道、滚珠、轴承外圈的加工误差,大幅度提高机械轴系回转精度。下面对关键零件尺寸的误差分配进行校核。

主轴沟道精度 $2\ \mu\text{m}$,滚珠精度 $1\ \mu\text{m}$,轴承外圈精度 $1\ \mu\text{m}$ 。

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{主沟}}^2 + \delta_{\text{滚珠}}^2 + \delta_{\text{外圈}}^2} = 2.4\ \mu\text{m}$$

两轴承间距为 $L = 46\ \text{mm}$

$$\delta_{\text{轴系}} = \arctan \frac{\delta}{L} = 10.8'' = \pm 5.4''$$

4.2 光机总误差(光轴回转误差)分析

光轴回转精度是消像旋组件的重要指标,主要取决于外部主光轴、机械轴系和棱镜视轴这三个轴自身的精度,以及它们两两之间的重合度。外部主光轴精度就是自准直仪1的精度,由于自准直仪自身精度很高,误差可忽略不计。机械轴系和棱镜视轴自身误差为固有误差。外部主光轴与机械轴系、外部主光轴与棱镜视轴之间的重合度可调,前者通过消像旋组件与自准直仪1自准调节、后者通过棱镜的一维调整机构调节,两者的误差为自准直仪1与自准直仪2的读数误差。

轴系精度 $\pm 5.4''$,棱镜加工精度 $\pm 5''$,读数误差 $\pm 4''$ 。因此,光机总误差为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{轴系}}^2 + \sigma_{\text{棱镜}}^2 + 2\sigma_{\text{度数}}^2} = \pm 9.3'' < \pm 15''$$

因此,该设计满足系统指标要求。

5 光机装调与精度检测

5.1 轴系回转精度检测

根据 GJB1801-93 给出的测量倾角回转误差的检测方法,并结合3中所述的装调与检测方法,对机械轴系进行精度检测^[6]。消像旋组件顺时针与逆时针各旋转一周,每隔 30° 记录下偏角数据,共计检测 26 组数据,结果如表1所示。

表1 轴系精度检测数据

Tab.1 Testing data of shafting precision

旋转角度	方位坐标 X_1	俯仰坐标 Y_1	方位坐标 X_2	俯仰坐标 Y_2
0	0.45	9.27	-0.59	9.24
30	4.01	4.5	2.84	3.68
60	2.3	0.09	1.46	-0.38
90	-1.26	0.26	-2.04	-0.15
120	-1.26	4.34	-2.14	2.97
150	1.67	7.6	-0.14	6.48
180	7.36	8.25	6.09	7.65
210	7.95	5.14	7.97	4.8
240	3.41	0.84	4.98	0.63
270	-1.02	0.42	-1.4	-0.68
300	-5.47	3.23	-5.89	1.77
330	-5.15	8.84	-5.8	7.68
360	0.58	10.09	1.06	9.83

利用 GJB1801-93 给出的数据处理方法对表1记录的数据进行计算,得出机械轴系的回转误差为 $\pm 7.4''$

5.2 光机装调与光轴回转精度检测

根据3中所述的装调与检测方法,在自准直仪2

中观察并记录靶标画圆结果如图 4 所示:图中菱形点构成的轨迹为棱镜顺时针旋转时靶标记录的轨迹;方形点构成的轨迹为棱镜逆时针旋转时靶标记录的轨迹。可以看出,两次轨迹接近,画圆规律相同。根据图中轨迹的覆盖的横纵坐标范围可知光轴回转误差在 $\pm 12''$ 以内。满足系统 $\pm 15''$ 的指标要求。

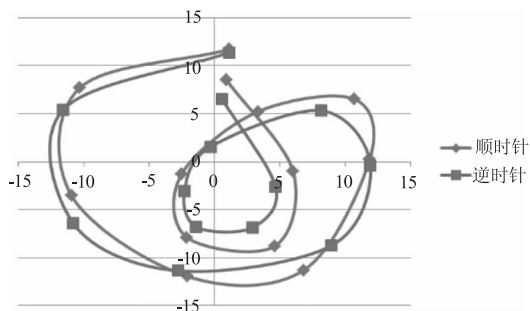


图 4 装调结果

Fig. 4 Alignment result

6 结 论

经过光机装调后的消像旋组件,虽然机械轴系回转误差 $\pm 7.4''$ 与理论分析值 $\pm 5.4''$ 相比较有所超差。进而也导致光轴回转误差 $\pm 12''$ 与理论分析值 $\pm 9.3''$ 相比较也有所超差,但是符合 $\pm 15''$ 的系统指标要求。将消像旋组件装入瞬时视场为 $32''$ 的红外热像仪光学系统中,棱镜旋转一周,靶标的抖动量不超过一个像素。同时该消像旋组件也具有体积小、重量轻、稳定性强的特点。装配与光轴调试的流程与方法也比较简单,具有较强的可操作性。总体满足系统指标要求,且应用效果良好。

参考文献:

- [1] Zhang Xiangming. Technology study on optical system fabrication and alignment of vehicle panoramic sight platform [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [2] Liang Lihui, Wan Qiuhua, She Ronghong. Shaft design and error analysis of the composite optical encoder [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39 (12): 2194 - 2199. (in Chinese)
- 梁立辉, 万秋华, 余容红. 复合式光电编码器精密轴系设计及准确度分析 [J]. 光子学报, 2010, 39 (12): 2194 - 2199.
- [3] Liu Hongxu, Ren Keke. Structure error analysis of two-axis optic-electrical turntable based on the multi-system kinematics [J]. Laser & Infrared, 2015, 45 (10): 1239 - 1243. (in Chinese)
- 刘宏旭, 任珂珂. 基于多体理论的两轴光电转台结构误差分析 [J]. 激光与红外, 2015, 45 (10): 1239 - 1243.
- [4] Hui Gangyang, Yang Haicheng, Jiang Feng, et al. Alignment technology of offsetting image rotation prism in periscopic sight [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34 (4): 700 - 705. (in Chinese)
- 惠刚阳, 杨海成, 姜峰, 等. 潜望式瞄准镜中消像旋棱镜的装调工艺技术 [J]. 应用光学, 2013, 34 (4): 700 - 705.
- [5] Pan Junwei, Zong Guanghua. Design and motion control of one-axis precise test turntable [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2016, (4): 170 - 171. (in Chinese)
- 潘俊威, 宗光华. 单轴精密测试转台的设计与运动控制 [J]. 机械工程与自动化, 2016, (4): 170 - 171.
- [6] Lu Bihong. New measuring method for precision axes angular error motion [J]. Journal of Jiamusi Institute of Technology, 1990, (4): 14 - 18. (in Chinese)
- 卢碧红. 测量精密轴系角误差运动的新方法 [J]. 佳木斯工学院学报, 1990, (4): 14 - 18.