

## 离轴光学系统封装技术的研究

贾朋磊, 陈 钢, 陈晓南, 庞宣明

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 针对某型号头盔显示器光学系统的封装要求, 研究了光学镜片的加工、检测及装配工艺特点, 提出了一种能很好解决离轴光学系统装配难题的方法, 并结合现代制造工艺水平, 设计了相应的五自由度装调设备。经误差分析及控制系统对导轨误差的主动补偿, 设备的角度调整精度为  $3.15''$ , 位移调整精度约为  $1\ \mu\text{m}$ 。光学镜筒采用曲面造型, 为薄壁对开式结构。选用铝合金材料, 装配完成后单个镜筒总质量 195 g, 最大应力为 1.5 MPa, 最大变形  $0.3\ \mu\text{m}$ , 满足设计要求。

**关键词:** 光学封装; 离轴光学系统; 光学镜筒; 头盔显示器

**中图分类号:** V241.05   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3379-05

## Assembly technology of off-axis optical system

Jia Penglei, Chen Gang, Chen Xiaonan, Pang Xuanming,

(College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To meet the assembling requirements of the optical system of a certain Helmet Mounted Display(HMD), features of the lens in manufacturing, testing and assembly were investigated. And finally, an effective way that could solve problems in assembly of off-axis optical system was proposed. With modern production technologies, an adjusting device with five degrees of freedom was designed. After error analysis and active compensation to parallelism error of guide rail, the adjusting precision of angle for the device is  $3.15''$ , while the displacement adjusting accuracy is about  $1\ \mu\text{m}$ . Furthermore, surface modeling was brought into the design of lens tube, which adopted a thin shell and was divided in two parts, to get compact structure. After comparison, aluminum alloy was selected as the material for lens tube, and some essential analyses were given to the single tube unit. The results showed that the total mass of the tube unit is 195 g, while the maximum stress acting on it is only 1.5 MPa, with the deformation of  $0.3\ \mu\text{m}$ . It turned out that the solution satisfied the requirements of design.

**Key words:** optical assembly; off-axis optical system; optical lens tube; helmet mounted display

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-15

作者简介: 贾朋磊(1988-), 男, 硕士生, 主要从事机械结构设计、系统装调等方面的研究。Email: 419902054@qq.com

导师简介: 陈晓南(1955-), 男, 教授, 主要从事机械设计及理论、微型机电系统(MEMS)等方面的研究。Email: xnchen@mail.xjtu.edu.cn

## 0 引言

随着科技的发展,现代空战环境日趋恶化,头盔显示器以其突出优势将逐渐取代平视显示器<sup>[1-2]</sup>,成为未来战机的制胜法宝。美国是最早开始对头盔显示器进行研究并使用的国家,在越南战争中就曾使用早期的头盔显示器进行武器瞄准,随后又有 Agile Eye、JHMCS、Scorpion 等项目为其 F-15、F-16 及 F-18 战机开发头盔显示器,近年专门针对 F-35 战机的 HMDS 项目更代表了世界最先进水平<sup>[3]</sup>。而国内在这一方面起步较晚,主要还依靠进口<sup>[1]</sup>。

离轴光学系统由于体积小、重量轻等方面的优点<sup>[4]</sup>,成为头盔显示器光学系统首选,但其封装难度却很大。曾有研究所提出利用三坐标打点并修磨隔圈的封装方法,但存在镜片调整难度大、装调成功率低、系统偏重等缺点,不适合应用于头盔显示器。目前国内针对封装方面的研究文献仍相对缺乏,而国外关于这一方面的研究属于技术封锁范畴,检索不到相关参考文献。因此,开展这一方面的研究对缩小同国外差距具有重要的现实意义。文中针对某型号头盔显示器光学系统封装要求进行了相关研究,取得了一定成果。

## 1 装调方案的确定

### 1.1 面临的装调难题

如图 1 所示,该头盔显示器光学系统共有 6 片镜片组成,每片均由完整柱面镜切去多余部分而得,各镜片角度不一,为典型的离轴光学系统。根据设计要求,镜片间位置误差不超过  $2\ \mu\text{m}$ ,光轴角度误差不超过  $10''$ ,装配完成后,单个光学镜筒组件质量不能超过 200 g。

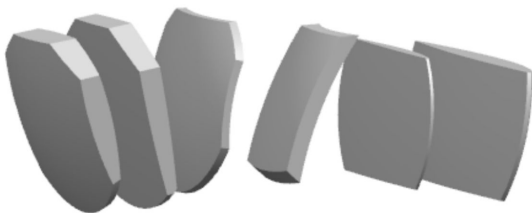


图 1 某型号头盔显示器光学系统

Fig.1 Optical system of a certain HMD

系统装调需要解决以下难点:

(1) 离轴光学系统中各镜片光轴互为异面直线,找不到类似共轴系统那样可供参考的统一基准边装边调,或是根据成像效果边装边调。

(2) 镜片布局及装配要求限制光学镜筒为造型不规则的薄壁壳体,极难或是无法加工出用于镜片定位的高精度基准。

(3) 光学系统装配精度要求高,即使采用高精密元件组装装调设备,其各位移与角度方向累积误差仍能导致装配精度不合格。

(4) 传统整体式光学镜筒显然不适合该系统结构,如何合理对镜筒分段,并在不破坏镜片装配精度、不增加系统质量的情况下有效联接各段,关乎系统装配的成败。

### 1.2 具体装调方案

结合图 2,该方案的装调原理为:

(1) 整个装配过程以装调设备原点为参考基准,镜筒为对开式结构,分为左半镜筒 1 和右半镜筒 2,首先使用镜筒 1。

(2) 需装配镜片在定心设备上定心后<sup>[5]</sup>,不与定心接头分开,二者作为整体直接装夹到装调设备中<sup>[6]</sup>,利用定位元件找到定心接头外圆柱面轴线,也就确定了镜片光轴在装调设备中具体位置。

(3) 挡块主要用于对非球面镜的周向定位,球面镜则无需挡块。

(4) 测头沿镜片光轴移动,测量出镜片定心顶点(图中 A、B 点)在装调设备中的坐标位置。

以上可确定出镜片在设备中的坐标位置及光轴角度。

(5) 镜片 1 为第一块镜片,直接由调整装置移至镜筒 1 合适位置处,用胶粘接固定<sup>[7-8]</sup>,然后分离接头,镜片 1 装配完成,其位置由装调设备记录,作为后续镜片的位置参考。

(6) 按照(2)、(3)、(4)所述装夹镜片 2,参考镜片 1 位置及二者正确装配的相对位置关系,换算出镜片 2 的调整量,由调整装置将其调整至装配位置,然后用胶固定,分离接头后,完成镜片 2 的装配。

(7) 类似(6),依次完成后续镜片的装配。

(8) 检验系统成像质量是否合格。

(9) 预先在镜筒 2 需与镜片接触位置处涂抹适量胶水,然后小心与镜筒 1 合在一起。

(10) 检验系统成像质量是否合格。

(11) 对装配合格的系统,在两筒身结合处使用冷焊技术将二者焊接成为一体。

(12) 装配完成。

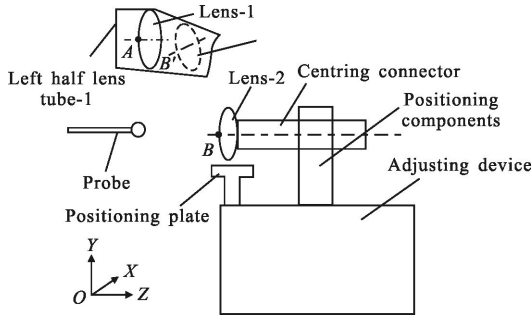


图 2 装调方案原理图

Fig.2 Theory diagram of assembly scheme

图 3 所示为镜筒装配体主、左视图局部简易视图。由图可知,镜片左右两侧卡入镜筒壁槽后用胶粘接,上下两侧则直接与筒壁粘接,便于镜筒 1、2 的合拢。左右两半镜筒采用冷焊联接,即不影响装配精度、额外增加装配质量,又可以保证联接强度。筒身开孔一方面减重,同时也利于观察内部粘接质量。由于这一装配结构是靠装调设备直接将镜片位置、姿态调整准确后粘接固定至镜筒,镜筒本身无需加工出高精度定位基准,可极大降低镜筒的设计加工难度,同时大大减少镜筒结构优化设计的限制,更加利于系统的轻量化设计,为后续系统的减重优化提供便利。

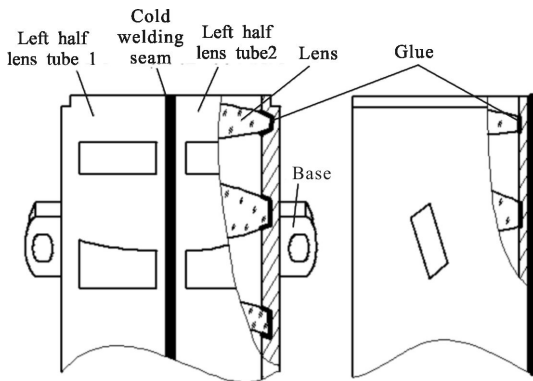


图 3 镜筒装配体局部视图

Fig.3 Local drawing of assembly

## 2 装调设备的设计

### 2.1 设备模型的建立

建立设备模型如图 4 所示。

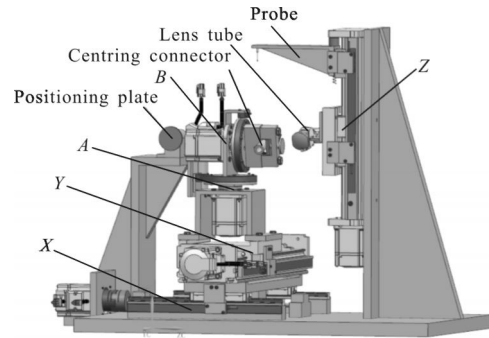


图 4 装调设备模型

Fig.4 Modal of adjusting device

根据图 2 中表述,空间中,将镜片定心顶点由  $B$  移动至  $B'$  需要 3 个方向的平移,而光轴角度调整准确需要两个方向的转动。因此,装调设备为五自由度结构。

$X, Y, Z$ : 3 个平移运动均由伺服电机、滚动导轨智能组件、直线光栅等元件组成,为闭环控制系统。

$A, B$ : 两个转动均由伺服电机直接驱动,结合圆光栅等元件构成闭环控制系统。

测头: 主要由探针、滑块、光栅读数头等元件组成,与  $Z$  轴共用导轨、直线光栅等,减少误差源。

其他元件结构、位置如图中所示。

### 2.2 精度分析<sup>[8]</sup>

设备的系统误差主要由导轨平行度误差、光栅系统分辨率、接头定位误差等构成。

光轴角度的调整是由伺服电机直接驱动完成,因此,角度调整误差主要由圆光栅系统精度决定,根据具体选用的圆光栅组件,该误差为  $2.23''$ 。由此得设备的角度调整误差为:

$$\sigma_{\text{角}} = \sqrt{2.23^2 + 2.23^2} = 3.15''$$

根据现代制造工艺水平,较精密滚动导轨组件的行走平行度误差可控制在  $1 \mu\text{m}$ ; 直线光栅系统分辨率为  $0.5 \mu\text{m}$ ; 测球及镜片制造精度均极高,测量时的接触误差可控制在  $0.5 \mu\text{m}$ , 高于光栅系统分辨率,包含在了光栅系统误差内,可忽略不计。因此  $X, Y, Z$  方向的位移误差均为  $2.5 \mu\text{m}$ , 则设备的位移调整误差为:

$$\sigma_{\text{位}}' = \sqrt{2.5^2 + 2.5^2 + 2.5^2} = 4.3 \mu\text{m}$$

由于制造误差,定心接头在设备中的定位也存在误差,但借助高精度测量设备可事先测出定位元件的制造、装配误差,从而在调整过程中加以修正,

这一方面的误差同样包含在了光栅系统误差内,可忽略不计。

因此,设备的最终位移调整误差为:

$$\sigma_{\text{位}} \approx 4.3 \mu\text{m}$$

显然设备的位移精度不能满足光学系统装配的高精度要求,需做出改进。

### 2.3 误差补偿措施

尽管滚动导轨精度选用为最高等级,其制造误差仍不能满足装调精度要求,为此文中提出一种误差补偿方法,在不更换设备元件及改变结构的情况下,降低位移调整误差。

图 5 为行走平行度误差的测量方法,基于此,对滑块施加同样的工作载荷条件,并多次往返移动,将探针捕捉到的多组全行程误差输入到计算机中,然后进行数据采样、拟合等相关处理,最终可得到滑块在水平和垂直两个方向的误差分布图。

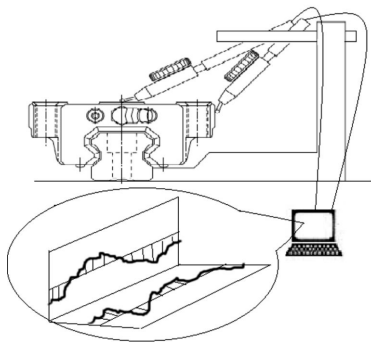


图 5 行走平行度误差提取

Fig.5 Walking parallelism error extraction

将得到的 X、Y、Z 组件的行走平行度误差分布数据存放于装调设备的控制系统中,这样,便可在调整镜片时通过适当改变滑块的移动距离来抵消相应的平行度误差,则该方面的误差即可由光栅系统精度决定。

改进后设备位移调整误差为:

$$\sigma_{\text{位改}} = \sqrt{0.5^2 + 0.5^2 + 0.5^2} = 0.87 \mu\text{m}$$

显然,经误差补偿后设备精度显著提高,满足装配要求。

## 3 光学镜筒的结构设计

### 3.1 镜筒结构设计

为满足系统严格的质量要求,镜筒结构设计使

用了专业优化软件 HyperWorks 进行了结构优化,图 6 为优化效果图。

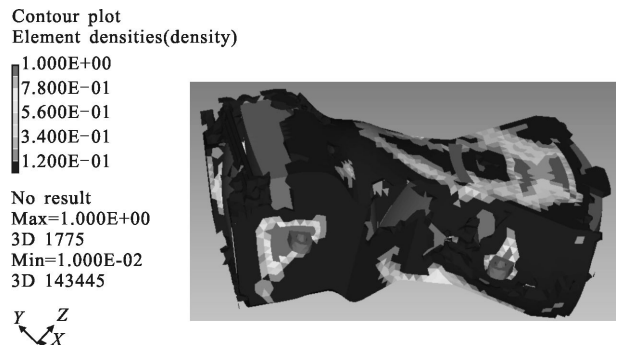


图 6 镜筒结构优化效果图

Fig.6 Optimized structure of optical tubes

最终,镜筒结构采用对开式,可方便地将镜片从同一侧调整、粘接,而采用曲面造型,又使结构节奏,如图 7 所示。选用铝合金材料<sup>[9]</sup>,其质量为 43 g,装配完成后单个镜筒质量 195 g,满足系统质量要求。

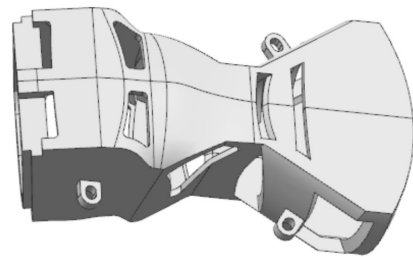
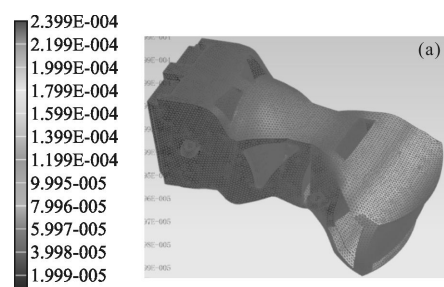


图 7 光学镜筒结构

Fig.7 Mechanical design of optical tubes

### 3.2 镜筒强度分析

头盔显示器最终是要用到战机上,战机飞行状态变化时会产生很大的加速度,因此需要对镜筒进行相应的强度分析。考虑到人体所能承受到的加速度极限约为 10 G,借助有限元分析软件对镜筒强度分析,如图 8 所示。结果表明,最大应力为 1.5 MPa,最大变形 0.3  $\mu\text{m}$ ,满足强度要求。



(a)

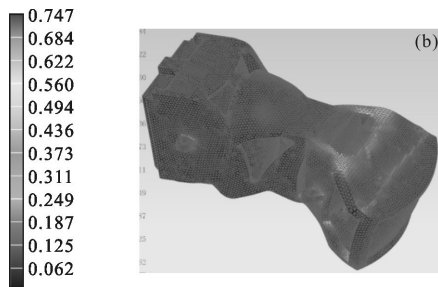


图 8 结构强度分析

Fig.8 Structural strength analysis

## 4 结 论

针对光学系统在封装方面所面临的问题,提出了可行的装调方案,解决了离轴光学系统的封装难题。设计了高精度装调设备及相应的光学镜筒,并进行了强度分析。结果表明,装调设备位移精度约为  $1\ \mu\text{m}$ ,角度精度为  $3.15''$ ,满足装调精度要求;装配完成后单个镜筒质量  $195\ \text{g}$ ,承受最大应力  $1.5\ \text{MPa}$ ,最大变形  $0.3\ \mu\text{m}$ ,满足质量和强度要求。综上所述,该离轴光学系统封装技术可行。

## 参考文献:

- [1] Wu Weiling, The Development of helmet mounted display: a review [J]. *Science & Technology Information*, 2010, 33: 52-61. (in Chinese)  
吴卫玲. 头盔显示器的技术发展综述[J]. 科技信息, 2010, 33: 52-61.
- [2] Zhao Yanyu, Cao Liangcai. The development of helmet mounted display: a review [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2011, 25(6): 559-562. (in Chinese)  
赵雁雨, 曹良才. 头盔显示器技术发展综述 [J]. 测试技术学报, 2011, 25(6): 559-562.
- [3] Li Hua, Zhang Xin, Shi Guangwei, et al. Review and analysis of avionic helmet-mounted displays [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11): 1328-1342.
- [4] Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi, et al. Optical design of a off-axis dual-channel helmet mounted display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2662-2667. (in Chinese)  
佟静波, 崔庆丰, 薛常喜, 等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2662-2667.
- [5] Shu Chaolian. Modern Optics Manufacturing Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)  
舒朝濂. 现代光学制造技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] Yuan Tao, He Xin. Design of compensator adjustment device for aspheric optical system of space remote sensor [J]. *Infrared*, 2012, 33(10): 7-10. (in Chinese)  
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.
- [7] Zhang Kai, He Xin, Cui Yongpeng. Assembly technology of frame structure of space camera's body [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 91-95. (in Chinese)  
张凯, 何欣, 崔永鹏. 空间相机机身桁架装配工艺[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 91-95.
- [8] San Bing, Li Jinglin. Focusing device design of the large aperture optics system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 329-332. (in Chinese)  
伞兵, 李景林. 大口径反射光学系统调焦机构设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 329-332.
- [9] Miao Jianyu, Zhang Liping, Wu Qingwen, et al. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(9): 1648-1653. (in Chinese)  
苗建宇, 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.