

文章编号 1004-924X(2008)09-1648-06

测绘相机光学镜筒设计、加工及装配

苗健宇^{1,2}, 张立平¹, 吴清文¹, 王向东³, 韩旭^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春奥普光电技术股份有限公司, 吉林 长春 130031)

摘要:研究了光学镜筒的设计、加工和装配。从材料选取、结构形式确定和性能分析等方面论述了测绘相机光学镜筒的设计过程,探讨了透镜支撑结构-薄壁壳体的加工方法。最后,介绍了单镜组和主镜筒的装配过程。通过比较,选取铸钛合金 ZTC4 作为镜筒的材料,采用单镜组加筋壳结构的组合形式,运用 PATRAN/NASTRAN 软件对主镜筒的分析表明其结构强度和刚度很好,可满足相机结构要求。薄壁壳体通过精密铸造,再经过车削而成,各定位阶梯内圆柱面同轴度达到 0.01 mm。镜筒装配要点是无变形安装固定透镜、精确控制空气间隔和高精度定心。装配完成的镜头光学传递函数达到 0.43(77 lp/mm),满足测绘相机精度要求。

关键词:测绘相机;光学镜筒;设计;加工;装配

中图分类号:V475.3;P231 **文献标识码:**A

Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera

MIAO Jian-yu^{1,2}, ZHANG Li-ping¹, WU Qing-wen¹, WANG Xiang-dong³, HAN Xu^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Changchun UP Optotech Co., Ltd., Changchun 130031, China*)

Abstract: For purposes of designing a mapping camera with high image quality for stereoscopic mapping task, the design, manufacturing and assembly for the lens of a mapping camera are investigated. the design of the lens is issued from material choice, structure decision, performance analysis, and so on. Then, the processing methods for thin shell supporting structure of the lens are discussed. Finally, the assembly process of single lens unit and primary lens is introduced as well. After comparison, ZTC4 is selected as the material for lens tube, and a single lens unit and a thin shell are adopted to a combination format. Analysis results with PATRAN/NASTRAN indicate that the lens shows a good mechanical intensity and stiffness and can satisfy the requirement of structure of single lens. The thin shell is gained through casting and turning precisely, and the co-axiality of column in orientation ladders is 0.01 mm. During the assembly of lens, it is very important to keep no deformation, to control a air space accurately and to position a high precision center for assembly. The tested result shows that the optical transfer function of single lens can reach to 0.43(77 lp/mm), which can meet the re-

收稿日期:2008-05-21;修订日期:2008-07-08.

基金项目:中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助项目

quirements of precision for a mapping camera.

Key words: mapping camera; optical lens; design; manufacturing; assembly

1 引言

三线阵 CCD 立体测绘相机是无地面控制点传输型摄影测量卫星理想的有效载荷^[1]。目前,利用三线阵测绘卫星对地球或其它星球测绘,已成为航天摄影测量与遥感领域的研究热点问题^[2-3]。

测绘相机由正视相机、前视相机和后视相机组成。3台测绘相机均为折射式准像方远心光学系统,25°交汇角测量,成立体图像。正视相机焦距为650 mm,由8片透镜组成,前、后视相机焦距均为717.196 mm,各由7片透镜组成。光学

镜筒(MIL-STD-1241A 美国军用标准定义)是安装透镜的机械结构,它用于确定光学元件的轴向和径向的相互位置,并给出与其它部件的联结方式。可见,光学镜筒的设计、加工及装配是保证测绘相机成像质量的关键。

2 光学镜筒设计

2.1 材料选取

空间光学遥感器镜筒应用的材料主要有铝合金、钛合金、碳纤维复合材料等。表1列出了几种典型材料的性能参数。

表1 空间光学遥感器常用典型结构材料性能

Tab.1 Performance of typical structural materials for space optical remote sensors

材料名称	密度 ρ (g/mm ³)	弹性模量 E (10 ¹⁰ Pa)	热导率 λ (W/m·°C)	比热容 c (J/kg·°C)	比刚度 E/ρ (10 ⁷ N·mm/g)	热膨胀系数 α (10 ⁻⁶ /°C) (-60~120 °C)
铝合金 7A09	2.8	7.1	142	904	2.54	23.6
钛合金 TC4	4.44	10.9	7.4	611	2.45	9.1
铸钛合金 ZTC4	4.40	11.4	8.8	577	2.59	8.9
碳纤维复合 材料 T300B	1.8	纵向 3.1	9.5 8.5		5.28 1.72	0~1 (铺层工艺确定)

测绘相机镜头在光学设计时,为满足设计指标,部分透镜的径厚比设计偏薄,透镜容易变形,要求镜筒材料的热膨胀系数与透镜材料相兼容;光学设计要求测绘相机在轴向温差±1 °C,径向温差±0.3 °C的环境下工作,温差要求严格,需要镜筒材料有较高的结构稳定性。通过比较,铸钛合金与所选光学玻璃的热膨胀系数最为接近;钛合金通过热真空失效后,应力释放率可达到95%,这种方法处理后会使得钛合金有良好的结构稳定性。综合国内外空间光学遥感器应用材料的经验,选取铸钛合金 ZTC4 为镜筒的结构材料。

2.2 结构设计

光学设计的基础建立在整个光学系统的一条旋转对称轴——光轴上,即各个起光学作用的表面的曲率中心都应位于这条光轴上。光学镜筒的主要功能就是保证各个透镜的球面中心与光轴重

合,并使各透镜相互间的间隔满足光学设计要求^[4-5]。要保证整个光学镜筒中每个光学折射面的定心精度,必须减少定中心基准轴的环节,将整个光学镜筒的定中心环节放在镜筒最后的总装上,其核心是通过精密研磨镜座以及精密调整镜组在镜筒中的位置来保证各透镜间的间隔和同轴要求。因此在光学镜筒设计上要为总装留有充分的调整环节,每块透镜都要有独立的镜座;设计出用于支撑各独立镜座的薄壁壳体结构,并要求壳体内所有定位阶梯内圆柱面同轴。

测绘相机主镜筒内有8片光学零件,其中前两片分别是窗口玻璃和窄带滤光片,通过隔圈装配在一个镜座内,其余6片球面透镜分别装在独立的镜座内,镜座和压圈同样采用铸钛合金材料。主镜筒内有7组独立的单镜组,如图1所示。

单镜组采用压圈固定法:把光学零件装入带

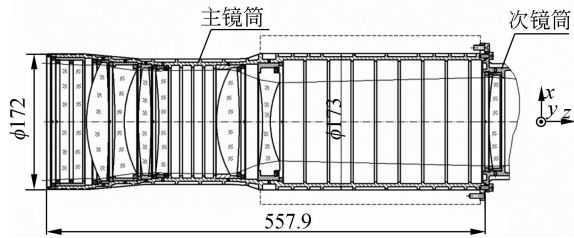


图 1 测绘相机主镜筒

Fig. 1 Primary lens of mapping camera

有内螺纹的镜座中,依靠光学零件外圆与镜座内孔的配合及端面轴向定位,再利用带有外螺纹的压圈将光学零件压紧。此种固定法的优点在于结构可拆卸,装配方便,可以进行选配和修配。单镜组与薄壁壳体间的装配也采用压圈轴向固定法。如图 2 所示。

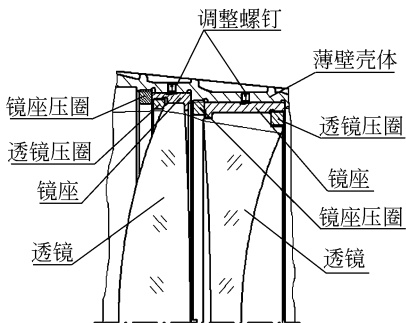


图 2 主镜筒局部放大图

Fig. 2 Local detailed drawing of primary lens

主镜筒薄壁壳体为典型的筋壳结构,外圆柱面分布有 8 条纵向加强筋和 23 条周向圆环形加强筋,加强筋可以使薄壁壳体的结构静强度得到提高^[6]。内表面为定位阶梯内圆柱面,并在相距较远两处定位阶梯圆柱面间设置消杂光光栏。如图 3 所示。

镜筒设计还需考虑如下几个方面:

(1) 相机热控实施的需要,在镜筒外表面纵向加强筋和周向圆环形加强筋交叉所构成的凹坑面各处粘贴加热片和热敏电阻,加强筋设置时要充分考虑到加热片和热敏电阻导线的布线方向及其固定方式。

(2) 薄壁壳体设计与相机支架的连接接口,采用孔配合和端面连接的固定方式,壳体与支架孔配合的外圆柱面设计锥形安装导向。

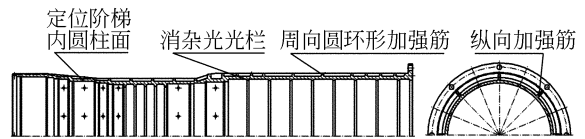


图 3 主镜筒薄壁壳体

Fig. 3 Thin shell with bafflers of primary lens

(3) 薄壁壳体内表面设计消杂光光栏,压圈内表面设计消杂光齿纹^[7]。

(4) 薄壁壳体内定位阶梯内圆柱面间应有较高的同轴度要求,用于镜座轴向定位的靠面应有较高的垂直度,以保证光轴的精确传递。

(5) 测绘相机属航天遥感器,光学设计按真空环境设计,在装调过程中会在透镜间遗留空气。空气的折射率会影响光路传播,还会在透镜内外形成气压差,造成透镜面形变化,严重地影响成像质量,在镜筒设计时必须考虑。

2.3 性能分析

运用 MSC. PATRAN 软件对主镜筒进行有限元建模,如图 4 所示。运用 MSC. NASTRAN 软件进行静力学和动力学分析。

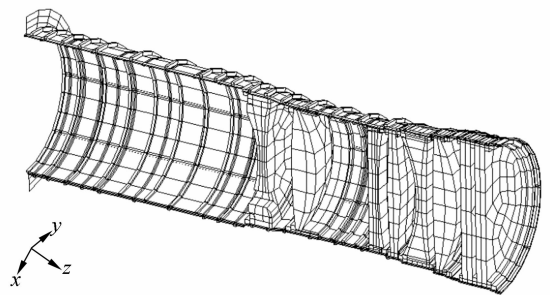


图 4 主镜筒有限元模型

Fig. 4 Finite element model of primary lens

2.3.1 重力释放变形分析

空间遥感器在地面进行研制,到空间微重力环境下工作。由于重力释放会使结构发生变形,导致光学零件位置发生相对变化。通过对主镜筒各个方向上施加 1g 重力进行静力分析,可得出结构的变形情况,进而了解结构的强度和刚度情况^[8]。将主镜筒的支撑法兰端面及外圆柱面与支撑结构配合处设为固定约束,在镜筒的 3 个方向施加 1g 重力,考查镜筒的最大等效力和变形值,如表 2 所示。

表 2 静力学分析结果

Tab.2 Results of static analysis

项目	x 向	y 向	z 向
等效应力(MPa)	0.283	0.277	0.186
变形(nm)	9.46	10.4	4.55

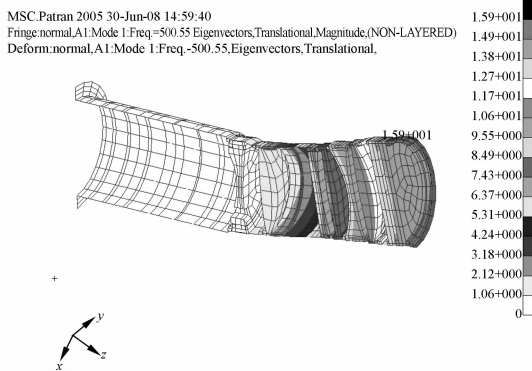
分析结果表明,镜筒各方向的受力都比较小,镜筒各方向的变形值与相机整体精度相比可以忽略不计。

2.3.2 发射阶段动力学分析

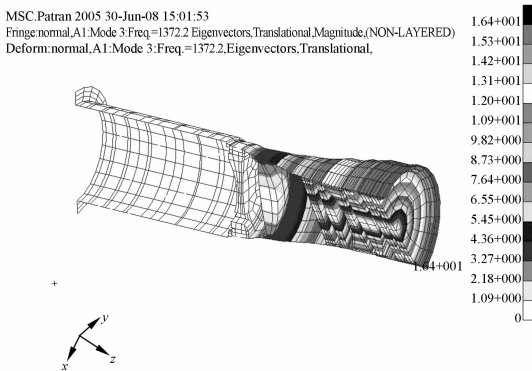
考核镜筒在发射时 5.5g 加速度的作用下,结构是否产生塑性变形,即最大应力值是否超出铸钛合金的屈服应力强度极限^[9],结果得到镜筒所受的最大应力值为 1.6 MPa,远小于铸钛合金的屈服应力极限 890 MPa,不会产生塑性变形,当 5.5g 的静力载荷释放后,能恢复到原来的位置。

2.3.3 结构动力学分析

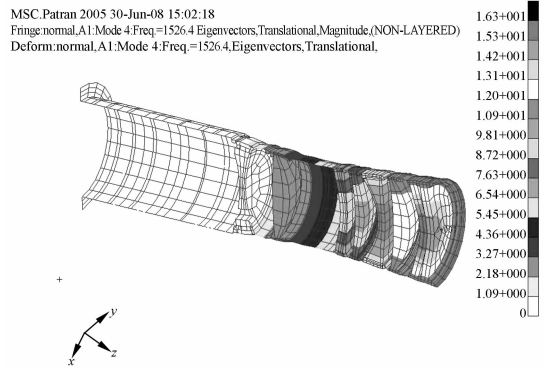
由于空间遥感仪器还要经历地面运输和发射运载等阶段,为保证结构在这些阶段不破坏、不变



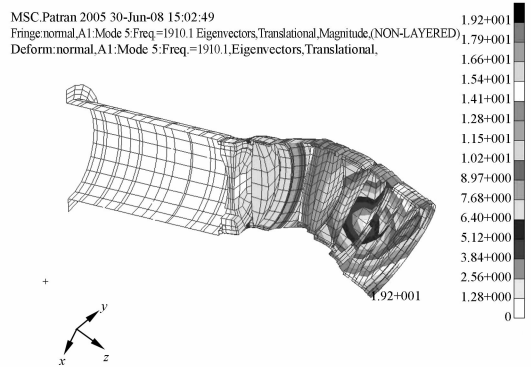
(a) 一阶模态
(a) The first mode



(b)二阶模态
(b) The second mode



(c)三阶模态
(c) The third mode



(d)四阶模态
(d) The fourth mode

图 5 主镜筒模态分析结果云图

Fig.5 Modal analysis results of primary lens

形,还要求它具备一定的动态特性,故需要进行动力学分析。首先对镜筒进行模态分析,模态分析结果云图如图 5 所示。前四阶的固有频率分别为 500.55 Hz、1 372.2 Hz、1 526.4 Hz 和 1 910.1 Hz,主镜筒的固有频率满足要求。

另外,还对主镜筒进行了正弦振动分析,对主镜筒各方向施加 5.5g 的加速度,结果如表 3 所示。

表 3 正弦振动分析结果

Tab.3 Results of sine vibration analysis

项目	x 向	y 向	z 向
最大响应加速度/g	5.60	5.62	5.47
放大倍率	1.038	1.042	1.014
最大应力/MPa	1.59	1.56	1.04

分析表明,主镜筒正弦振动响应较小,满足工程要求;各方向的最大应力都远小于材料的屈服应力极限。

综合以上分析,主镜筒的各项性能均满足航天测绘相机结构要求。

3 镜筒加工

镜座加工需要保证内外配合表面的同轴度和光学零件靠面的垂直度,相对于加工薄壁壳体而言较为容易,故这里只讨论主镜筒薄壁壳体的加工方法。薄壁壳体首先通过熔模精密铸造成铸件,再经过冷加工达到最后精度要求。

国内外铸造工艺迅猛发展,对于薄壁壳体的铸造可采取多种铸造方式,关键是考虑冷加工时加工余量值的设计问题。薄壁壳体总长度接近 558 mm,壳体的平均直径接近 $\Phi 170$ mm,平均厚度在 3.5 mm 左右。壳体尺寸链复杂,形位公差要求严格,加工过程中易出现变形。壳体铸件在外表面和内表面光栏处径向预留 3 mm 加工余量,定位阶梯内圆柱面径向和轴向均留有 3 mm 加工余量。

薄壁壳体铸件采用以车削加工为主的加工方式。为防止零件在车削的过程中产生变形,车削分成三步进行,即粗车、半精车,精车。在粗车、半精车后均进行真空时效处理,去除加工应力;在车削的过程中制作多种胎具用于零件定位,同时要注意装夹的对称性,尽量减少零件装夹时的夹紧力,并逐渐减少每次车削时的进刀量;刀具选用德国进口钛合金专用加工刀具,车削时根据进刀量的大小调整刀具的锋利程度。

最后精车时,刀具要锋利,切削量要小,并随时注意车削时零件温度的变化。另外,在精车前和精车过程中要保证基准的重复性和准确性,选择薄壁壳体的右端面为基准,并分两次进行研磨,端面的平面度和垂直度均要求达到 0.002 mm。

薄壁壳体各定位阶梯内圆柱面同轴度达到 0.01 mm,圆柱度达到 0.01 mm,各定位端面垂直度达到 0.005 mm。此精度已达到此类零件加工的工艺极限。

4 镜筒装配

镜筒装配分为透镜安装到镜座和单镜组安装到薄壁壳体两个过程,要求透镜安装位置必须接近理想状态。光学仪器的装配难度主要体现在无变形安装固定、空气间隔精确控制和高精度定心 3 个方面。

4.1 单镜组装配

单镜组结构示意图如图 6 所示。透镜径向固定采用弹性装配,即在透镜的外径 OD 与镜座的内径 ID 间具有足够的间隙,因而透镜可在镜座中做径向调整。首先调整镜座中心与内调焦定心仪基准轴线重合,然后将透镜安装到镜座内,通过顶丝调整透镜每个面的中心误差达到要求,用压圈轴向定位。最后退出顶丝注胶,待胶凝固后复检透镜中心误差和面形精度仍满足要求,则完成单镜组的装配。

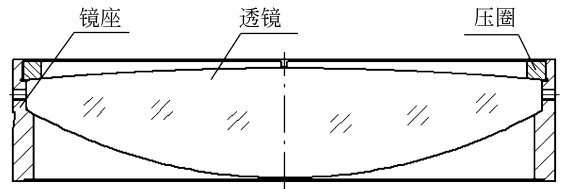


图 6 单镜组结构示意图

Fig. 6 Structural sketch of single mirror unit

4.2 主镜筒的装配

主镜筒的装配是将单镜组从上至下安装到薄壁壳体中。首先将薄壁壳体的中心轴线调整到与内调焦定心仪的基准轴线重合,薄壁壳体的安装

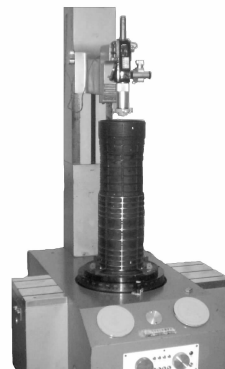


图 7 主镜筒装配过程照片

Fig. 7 Assembly photo of primary lens

基准面与内调焦定心仪的基准轴线垂直,如图7所示。然后顺次将单镜组安装到薄壁壳体中,通过精密研磨镜座端面和精心调整、测量,以达到每个面中心误差的要求和各透镜间空气间隔的要求。

5 结 论

测绘相机光学镜筒的结构材料为铸钛合金,采取单镜组,即镜座、透镜和压圈独立装配形成组件,进而装入薄壁壳体中的结构形式。分析表明,此种结构能够满足单台测绘相机技术指标的要求。单镜组装配方便,可拆卸性强,薄壁壳体整体

精度高,强度和刚度性能好,有利于达到多透镜同心精度。光学镜筒外层结构薄壁壳体通过铸造和冷加工而成,薄壁壳体形位公差要求严格,尺寸链复杂,冷加工难度大,其冷加工采取以车削为主的加工方法,车削过程中应注意刀具的选择、装夹的对称性、车削速度、基准的精确和重复性等问题。光学镜筒的装配分单镜组和整体装配两个过程,装配步骤简单,主要难度体现在无变形安装固定、空气间隔精确控制和高精度定心等3个方面,须注意装配过程中测量的严格性和重复性。最后装配出的测绘相机单只镜头光学传递函数达到0.43(77 lp/mm),满足测绘相机对镜头的精度要求。

参考文献:

- [1] 王任享. 三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理[M]. 北京:测绘出版社,2006.
WANG R X. *Satellite Photogrammetric Principle for Three-line-array CCD Imagery*[M]. Beijing: Sinomaps Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 胡莘. 三线阵测绘卫星的偏流角改正问题[J]. 测绘科学技术学报, 2006,23(5):321-324.
HU SH. The correction of drift angle of the three-line array mapping satellite [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006,23(5):321-324. (in Chinese)
- [3] 吴国栋. 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学精密工程, 2007,11(15):1727-1730.
WU G D. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,11(15):1727-1730. (in Chinese)
- [4] 吴清文. 空间相机中主镜及其支撑方案设计与分析方法[J]. 光学技术, 2004,30(3):153-156.
WU Q W. Design and analysis for primary mirror and its support of space camera [J]. *Optical Technique*, 2004,30(3):153-156. (in Chinese)
- [5] 魏全忠. 高性能光学系统定中心研究[D]. 成都:电子科技大学工程,2003.
WEI Q ZH. *The question is researched that how to confirm the center of objective lenses in the high performance optical system*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- [6] 王俊. 空间光学镜筒结构参数的探讨[J]. 光学精密工程, 1998,6(6):51-55.
WANG J. An investigation scheme on structural parameters of a space optical tube [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998,6(6):51-55. (in Chinese)
- [7] 田海英. 碳纤维复合材料应用于航天光学遥感器遮光镜筒[J]. 光学技术, 2003,6(11):704-706.
TIAN H Y. Carbon fiber composite material used in space optical instrument [J]. *Optical Tech.*, 2003,6(11):704-706. (in Chinese)
- [8] 刘春霞. 空间遥感器卡塞格伦镜筒的设计及轻量化研究[J]. 红外技术, 2006,5(5):253-256.
LIU CH X. Design and lightweight research of Cassegrain drawtube in space remote instrument [J]. *Infrared Tech.*, 2006,5(5):253-256. (in Chinese)
- [9] 杨洪波. 空间遥感相机镜筒主要参数工程分析与计算[J]. 光学精密工程, 1994,2(4):23-28.
YANG H B. Engineering analysis and calculation of the primary parameters for mirror drum of space remote-sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994,2(4):23-28. (in Chinese)

作者简介:苗健宇(1979—),男,辽宁铁岭人,主要研究方向为光学精密仪器光机结构设计及其制造技术。E-mail: mjiyokok@163.com

导师简介:吴清文(1968—),男,四川简阳人,博士生导师,研究员,主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 研究和空间光学遥感器热控技术的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn