

文章编号:1001-5078(2024)07-1136-05

· 光学技术 ·

# 一种卡塞格林反射系统的光机结构设计与分析

高世林, 魏梦琦, 张 赛, 李书培, 温庆荣, 徐明轩  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**本文介绍了一种卡塞格林反射系统(以下简称卡式组件或卡式系统)的光机结构设计与分析。首先根据设计输入,进行指标分解,完成卡式组件的光机结构设计。然后通过公差分析和仿真分析对设计进行迭代和验证。最后通过环境试验来验证加工装调完成后的卡式组件的可靠性以及环境适用性。本文介绍的卡式组件具有刚度强度高,可靠性及环境适用性强等特点,同时满足光学性能指标要求。

**关键词:**卡塞格林反射系统;光机结构设计;公差分析;仿真分析

**中图分类号:**TN216;TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.021

## The optical-mechanical structure design and analysis of a Cassegrain reflection system

GAO Shi-lin, WEI Meng-qi, ZHANG Sai, LI Shu-pei, WEN Qing-rong, XU Ming-xuan  
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** This paper describes the optical-mechanical structure design and analysis of a Cassegrain reflection system (here in after referred to as Cassegrain subassembly or Cassegrain system). At first decompose the index according to the design input. Finish the design of the Cassegrain subassembly. Then iterate and verify the design by tolerance and simulation analysis. At last verify the reliability and environmental probability of the machined and adjusted Cassegrain subassembly by environmental tests. The Cassegrain subassembly described in this paper has characteristics of high stability and rigidity, strong reliability and environmental probability. Also it meets the optical performance requirements.

**Keywords:** Cassegrain reflection system; design of the Cassegrain subassembly; tolerance analysis; simulation analysis

### 1 引言

卡塞格林反射系统(以下简称卡式组件或卡式系统)在军事侦查、航空航天等领域拥有广泛的应用背景<sup>[1]</sup>。具有大口径、长焦距、宽谱段、易于轻量化等特点。

卡式系统主要是由两块反射镜组成的一种同轴双反射系统。大的反射镜称为主镜,一般为抛物面镜;小的反射镜称为次镜,一般为双曲面镜。通常主镜中央开孔,成像位于主镜后面。

由于主镜的口径一般较大,而且主次镜十分敏感,如果所受应力过大,就会影响面型精度。大口径卡式系统光机机构设计是工程化关注的热点问题。本文介绍的卡式组件采用了无应力装卡技术,可以大幅度提高光学零件的面形精度。同时组件具有较高的刚度强度,以及可靠性和环境适用性。

### 2 某型卡式组件光机结构设计

#### 2.1 系统指标

系统要求的卡式组件的空间尺寸、重量、机械接

口和环境适应性等指标要求,以及光学指标要求(包括光学零件尺寸、位置、公差、性能要求等),如表1所示。

表1 指标参数

Tab. 1 Index parameters

重量/kg	16
光学 PV	$\lambda/2(\lambda = 633 \text{ nm})$
光学 RMS	$\lambda/10(\lambda = 633 \text{ nm})$
主镜直径(有效直径)/mm	440(430)
次镜口径/mm	85
高低温指标/ $^{\circ}\text{C}$	-40 ~ 55
冲击振动	Y8 螺旋桨飞机环境要求

## 2.2 结构设计

根据设计输入,进行卡式组件的光机结构设计,设计结果如图1所示:

表2 几种常用光机材料的性能参数

Tab. 2 Performance parameter of several commonly used optical and mechanical material

项目	材料	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\nu$	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$
光学零件材料	碳化硅(SiC)	3.10	376	0.18	$2.6 \times 10^{-6}$
	铝合金(6061)	2.68	68	0.33	$23.6 \times 10^{-6}$
	熔石英	2.2	73	0.17	$0.58 \times 10^{-6}$
	微晶玻璃	2.53	91	0.24	$0.05 \times 10^{-6}$
	硅	2.33	131	0.42	$2.6 \times 10^{-6}$
机械零件材料	钛合金(Tc4)	4.43	114	0.34	$8.8 \times 10^{-6}$
	铝合金(7075)	2.79	72	0.33	$23.4 \times 10^{-6}$
	殷钢	8.05	141	0.26	$1.26 \times 10^{-6}$

一般情况下,机械零件应当选择与光学零件热膨胀系数接近的材料。这样可以满足无热化设计要求,同时也可以满足热应力要求。也可依据实际重量要求与使用要求进行选择。

根据上述原则和表2的材料参数,主镜材料选择SiC,次镜选择熔石英,主要结构零件(主镜框、次镜支架、法兰盘、主镜后挡片)材料选择钛合金Tc4,其余次要零件选择铝合金7075。钛合金具有良好的强度,刚度,热膨胀系数也与SiC较为接近。而殷钢密度过大,重量难以满足系统指标要求。

### 2.2.2 主镜的轻量化设计

主镜的轻量化选择三角形减重孔<sup>[3]</sup>,由于SiC材料刚度比较好,可以设计较高轻量化率的主镜。主镜外圆直径440 mm,主镜边缘厚度6 mm,光学反

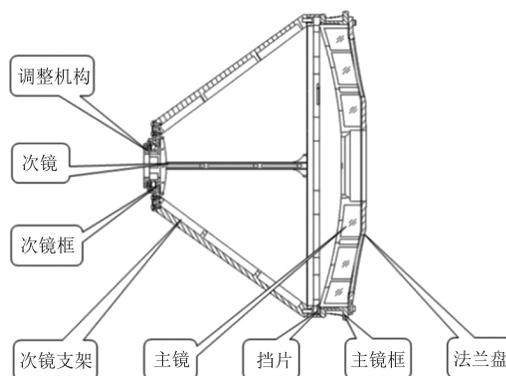


图1 某型卡式组件结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of a type Cassegrain subassembly

卡式组件主要由主镜、次镜、主镜框、次镜框、次镜支架、调整机构、前后挡片、方法兰盘等组成。

### 2.2.1 光机零件材料选择

根据卡式组件的结构形式,指标要求进行光机零件的材料选择。下面给出几种常用的光机材料的性能参数,如表2所示<sup>[2]</sup>。

射面平均厚度6 mm,三角筋厚度4 mm。由于交汇处筋厚达到16 mm,为了避免SiC在烧结的过程中产生应力集中,在三角筋交汇位置设计直径为8 mm的消应力孔,使壁厚均匀以减少烧结应力,如图2所示。



图2 主镜轻量化结构示意图

Fig. 2 Structure schematic diagram of lightweight primary mirror

### 2.2.3 主次镜的装卡方式

主镜的装卡方式采用主镜外圆与后表面定位,

外圆前段封胶,前端面保护的方式,如图3所示。

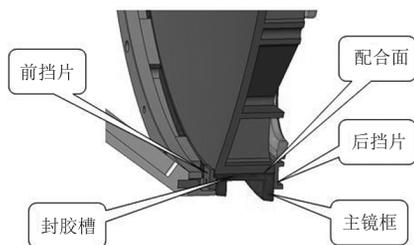


图3 主镜装卡方式

Fig. 3 Assemble method of primary mirror

主镜框后端面用作主镜的定位面。在主镜框后端面上安装后挡片,与主镜后端基准面贴紧。组件对外接口选择主镜框后端面。与卡式组件连接的机械件不与主镜接触。法兰盘也安装在主镜框后端面,法兰盘用于安装中间的透镜组,也可以对整个组件起到加强的作用,这里不做过多介绍。这样设计的好处在于,主镜的基准面就是卡式组件的基准,充分保证了主镜光轴与组件安装基准面的垂直度公差,同时还可以保证主镜的无应力装卡。主镜胶层厚度为 1.8 mm,封胶深度为 23 mm。

由于次镜较薄,背部封胶可能会影响次镜面形,因此次镜选择外圆与后表面定位,外圆前段封胶的装卡方式,如图4所示。次镜与主镜直径尺寸相差较大,次镜框外圆不会增加太多的遮挡。次镜胶层厚度为 1 mm,封胶深度为 3 mm。



图4 次镜装卡方式

Fig. 4 Assemble method of secondary mirror

#### 2.2.4 次镜支架的设计

次镜支架主要由大环、小环、和中间的连接杆组成。连接杆可以设计出减重槽。

对于连接杆数量的选择,我们选取三根连接杆与四根连接杆在遮挡率相同的情况下进行比较,三根连接杆的刚度总体上略优于四根连接杆<sup>[4]</sup>。

但是该系统外部有一个十字形加强筋的系统光窗,为了与之共形,不增加额外遮挡,次镜支架选择四根连接杆的设计。如图5所示。

次镜遮挡率的计算公式如下:

$$\eta = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 + n\gamma \frac{(D-d)}{2}}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (1)$$

式中, $\eta$ 为遮挡率; $D$ 为主镜有效直径; $d$ 为次镜直径,如果次镜采用上述装卡方式, $d$ 为次镜框的外径; $n$ 为次镜支架连接杆根数; $\gamma$ 为连接杆在光学正向投影面内的宽度。

本设计中 $\gamma = 10 \text{ mm}$ ; $D = 430 \text{ mm}$ ; $d = 91 \text{ mm}$ ; $n = 4$ 。根据公式(1)计算遮挡率 $\eta$ 为 9.2%。通常情况下,遮挡率 $\eta$ 小于 10%都是满足使用要求的。

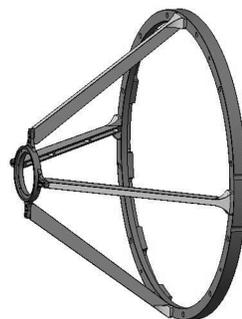


图5 次镜支架示意图

Fig. 5 Schematic diagram of secondary mirror support structure

#### 2.2.5 次镜装调与紧固方式

次镜的装调采用专用的光学调整机构,紧固采用垫片和环氧胶,如图6所示。这是一种比较常用的装调与紧固方式。装调过程五个维度都可以互相解耦,干胶过程对次镜位置精度和面型精度影响小。装调结果 $PV = 292 \text{ nm}$ , $RMS = 43 \text{ nm}$ 。

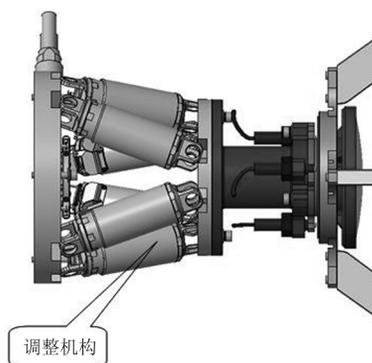


图6 次镜装调与紧固方式

Fig. 6 The secondary mirror adjustment and fastening method

### 3 公差分析与计算

#### 3.1 主镜光轴与组件安装基准面的垂直度

由于本文所介绍卡式组件,主镜基准面与组件对外的基准面是共面的,所以垂直度误差就是主镜光轴与主镜自身安装基准面的垂直度误差,没有引

入额外的误差。只需要将主镜安装面进行研磨,提高安装面的平面度,以减少主镜的安装应力,保证主镜面形。

### 3.2 主/次镜与主/次镜框配合间隙分析

由于光学零件与机械零件材料不同,在不同的温度条件下,配合间隙会产生增大或减小,计算公式如下所示:

$$\delta = \delta_0 + D(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T \quad (2)$$

式中,  $\delta$  为不同温度下,光学零件与机械零件的间隙值;  $\delta_0$  为常温下,光学零件与机械零件的初始平均间隙值;  $D$  为直径;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为机械零件与光学零件的热膨胀系数;  $\Delta T$  为相对常温的温度变化量,温度升高为正,反之则为负。一般情况下,为了保证主次镜无应力装卡,在所需的温度范围内间隙  $\delta$  的最小值必须大于 0。

主镜与主镜框配合采用 H7/e6 的基孔制配合<sup>[5]</sup>,主镜框孔尺寸公差为:440H7<sub>0</sub><sup>+0.063</sup>,主镜外圆尺寸公差为:440e6<sub>-0.175</sub><sup>-0.135</sup>。由此可以得出主镜与主镜框平均间隙为 0.19 mm。利用公式(2)计算出温度在 -40 ℃ 时,间隙平均值为 0.03 mm,满足大于 0 的要求。

次镜选取 H7/f6 的基孔制配合,经过计算也是符合要求的。

表 3 整体结果

Tab. 3 Overall simulation results

版本	x 向冲击	y 向冲击	z 向冲击	x 向振动	y 向振动	z 向振动	静力
变形	0.114	0.113	0.048	0.078	0.078	0.0017	0.01
应力	23.15	22.98	7.25	19.27	18.85	0.20	2.470

表 4 主镜结果

Tab. 4 Primary mirror simulation results

版本	x 向冲击	y 向冲击	z 向冲击	x 向振动	y 向振动	z 向振动	静力
变形	1.44 × 10 <sup>-5</sup>	2.09 × 10 <sup>-5</sup>	3.96 × 10 <sup>-4</sup>	8.94 × 10 <sup>-6</sup>	1.31 × 10 <sup>-5</sup>	2.2 × 10 <sup>-7</sup>	1.82 × 10 <sup>-7</sup>
应力	0.13	0.18	3.24	0.118	0.13	0.075	2.36

### 4.3 冲击仿真分析

如表 3 所示,冲击条件下卡式组件最大应力为 23.15 Mpa,同样小于材料许用应力,由于冲击是瞬时状态,所以冲击状态下不用考虑面型影响。因此,卡式组件在冲击条件下满足设计使用要求。

### 4.4 振动仿真分析

如表 4 所示,振动条件下卡式组件最大应力为

## 4 仿真分析

### 4.1 模态仿真分析

利用 ANSYS 对卡式组件进行模态仿真<sup>[6]</sup>,结果如图 7 所示。一、二阶模态为 180 Hz。一般情况下大于 100 Hz 即满足设计要求。

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	179.77
2	2.	180.25
3	3.	232.98
4	4.	312.22
5	5.	334.32
6	6.	339.69
7	7.	453.24
8	8.	485.68
9	9.	486.22

图 7 卡式组件模态

Fig. 7 Modal analysis of Cassegrain subassembly

### 4.2 静力学仿真分析

如表 3、表 4 所示,静力条件下卡式组件最大应力只有 2.47 Mpa,远小于材料许用应力,利用 sigfit 进行光学仿真,主镜 PV = 19 nm, RMS = 2.7 nm,符合光学指标。因此,卡式组件在静力条件下满足设计使用要求。

根据仿真结果,卡式组件在振动、冲击下的变形及应力结果均处于较小水平,最大应力 23.15 Mpa,远小于材料屈服极限,满足强度要求。

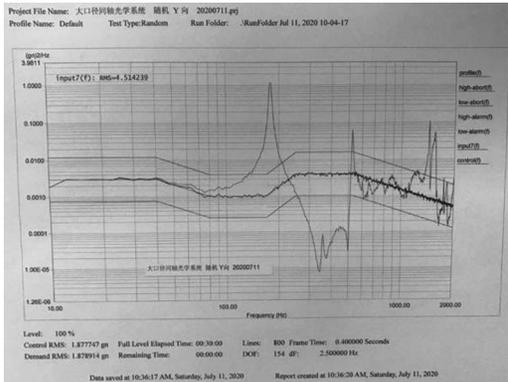
19.27 Mpa,同样小于材料许用应力,光学仿真主镜 PV = 29 nm, RMS = 6 nm,符合光学指标。因此,卡式组件在振动条件下满足设计使用要求。

## 5 试验验证

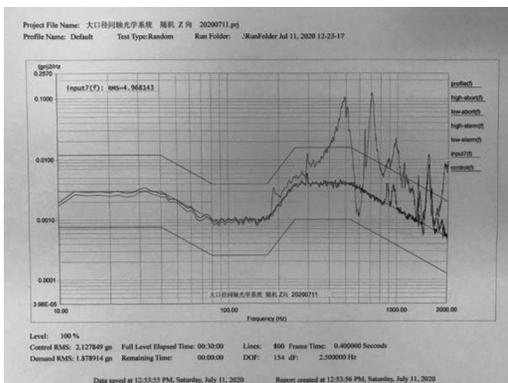
将上面设计的卡式组件加工装调出实物,记录下光学参数:PV = 292 nm, RMS = 43 nm。然后进行高低温与振动试验。高低温试验与振动试验参照

GJB150A - 2009 进行。

振动试验结果如图 8 所示:卡式组件沿径向方向振动时,在 180 Hz 左右出现共振点,沿光轴方向振动时,在接近 500 Hz 出现共振点,这与模态仿真的结果基本一致。由于组件安装的系统是有减震的,减震器截止频率小于 100 Hz,因此不影响使用。



(a)沿径向方向振动



(b)沿光轴方向振动

图 8 振动试验结果

Fig.8 The result of vibration test

经过高低温试验与振动试验后,再次测量光学指标: $PV = 306 \text{ nm}$ ,  $RMS = 51 \text{ nm}$ 。性能没有明显下降。因此本文介绍设计的卡式组件符合系统指标要求。

## 6 结论

本文介绍的卡式组件,可以实现主次镜的无应力装卡,具有重量轻,易于装调,刚度强度高,可靠性及环境适用性强,光学性能好等特点。这种设计理念还可以推广应用到一些离轴反射系统当中。目前

该组件已经应用于某型机载大口径光电预警系统当中,并取得了良好的探测效果。

## 参考文献:

- [1] Fu Jiaxin, Han Xu, Fu Yuegang, et al. Structure design and analysis of infrared reflection optical system [J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22 (5): 270 - 273. (in Chinese)  
付家鑫,韩旭,付跃刚,等. 红外反射式光学系统光机结构设计与分析[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22 (5): 270 - 273.
- [2] Paul R. Yoder, Jr. Opto-mechanical systems design [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)  
Paul R. Yoder, Jr. 光机系统设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] Wei Mengqi, Gao Shilin, WenQingrong, et al. The light-weight design and analysis of the primary mirror for a new airborne opto - electronic system [J]. Laser & Infrared, 2021, 51 (5): 634 - 639. (in Chinese)  
魏梦琦,高世林,温庆荣,等. 某机载光电系统主镜的轻量化设计与分析[J]. 激光与红外, 2021, 51 (5): 634 - 639.
- [4] Li Shenglin. Design of large diameter wide band coaxial testing [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)  
李盛林. 大口径宽波段共轴测试设备设计 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [5] Gan Yongli. Geometric tolerance and detection [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2008. (in Chinese)  
甘永立. 几何量公差与检测 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2008.
- [6] Wang Baoxu, Wu Fan, Jiang Shilei, et al. Optomechanical analysis and structure optimization of infrared Cassegrain optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (7): 1872 - 1878. (in Chinese)  
汪宝旭,伍凡,蒋世磊,等. 卡式红外光学系统光机分析及结构优化[J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (7): 1872 - 1878.