

# 空间高分辨率 CCD 相机次镜支架最佳结构设计

陈荣利 张禹康 樊学武 马臻 李英才

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘要** 根据某空间高分辨率 CCD 相机的结构设计方案, 利用结构设计软件 Solidedge 建立了次镜支架的结构分析模型, 并利用有限元分析软件 Vnastran 对不同结构和尺寸的次镜支架进行了动力学分析计算, 提出了次镜支架的鼓型偏置式四翼梁结构. 该结构具有较高一阶谐振频率和良好的机械加工性能, 特别适合用于大口径的空间相机中.

**关键词** 高分辨率; CCD 相机; 次镜支架; 有限元分析

**中图分类号** V445.8 **文献标识码** A

## 0 引言

可见光长焦距相机作为各国军事侦察手段中的重中之重而倍受关注. 随着分辨率的不断提高, 光学系统的焦距也在大幅度增长. 各国光学设计专家逐渐将目光转向了反射式系统. 因为反射式光学系统具有折射式和折反式光学系统所难以具备的诸多优点, 可以消除色差, 同时容易实现小型、轻量化, 对温度的灵敏度较低, 从而降低了对热控的要求. 近年来反射型光学系统逐渐替代折射系统成为主流<sup>[1]</sup>. 无论是 RC 系统还是各种型式的三反射系统, 在主反射镜前方都不可避免的有一块次镜(或称为副镜). 次镜与主镜间相对位置的变动对相机的成像质量具有很大的影响, 对于大口径相机次镜与主镜之间距离较远, 导致次镜连接结构刚性较差, 一旦次镜与主镜的相对位置发生变化将导致成像质量下降<sup>[2]</sup>. 如何设计次镜支架, 使其既能够满足光学设计的要求又能够适应空间相机严酷的力学环境是一个值得深入研究的问题.

## 1 次镜支架的设计

航天相机与地面相机有很大的不同, 从出所到入轨飞行, 要经历运输、吊装、搬运、振动、冲击及微重力等环境. 特别是振动, 它是空间飞行器最基本的力学环境. 振动加剧构件的疲劳和磨损, 甚至使结构发生大变形, 从而影响了系统的功能, 严重的会造成系统功能失效. 据不完全统计, 星、船上设备有 40% 的故障来源于振动.

次镜是非常敏感的光学部件, 其光学间隔或光轴的微小偏离, 会对相机的成像造成很大的影响. 次镜支架大小直接影响到光学系统的中心遮拦大小, 进而影响到光学系统传函的高低. 因此, 次镜的

支承结构尺寸应严格控制, 以保证相机的成像质量. 为适应发射环境还需要固有谐振频率足够高, 以避免火箭发射时的振动频率, 以免引起共振. 高分辨率相机作为卫星的有效载荷, 减轻重量具有十分重要的意义. 次镜支架作为高分辨率相机的重要组成部分, 除了在材料上选择低膨胀率高比刚度的轻质材料外, 结构设计上主要有两种型式.

第一种为 A 型的桁架结构, 如图 1. 这种结构通过次镜支架直接将主镜座和次镜座联接起来, 设计简洁, 降低了对镜筒的要求, 可以有效地减轻系统的重量. 但当系统焦距很长即主次镜间的间隔较大时, 连接杆(板)的长度加长形成悬臂, 支架的抗弯和抗扭性能都降低了. 为了保持同样的谐振频率, 连接杆的厚度大大增加, 这对于减重和减小中心遮拦都不利.



图 1 A 型桁架结构次镜支架

Fig. 1 A type truss bracket structure for the second mirror

在长焦距航天相机中, 多采用四翼梁结构作为次镜支架. 以色列的地球资源观测卫星上的轻型相机 EROS-A 就采用了这种结构形式(如图 2). 这种结构通过外环与相机的遮光筒连接. 要求相机遮光筒有足够的强度和刚度. 经典的四翼梁结构是中心对称成十字分布的薄板形支承结构. 这种结构的三大优点是: 1) 结构稳定; 2) 中心遮拦小; 3) 易于加工和装配. 与第一种形式相似, 这种结构形式具有很小的抗扭转刚度. 当相机的口径增大时, 四翼梁的叶片长度增加, 为了保证同样的谐振频率, 四翼梁片的厚度应以口径的  $5/3$  次方增长<sup>[3]</sup>. 这对于中心遮拦十分不利.



图2 四翼十字型支撑结构  
Fig.2 Crossed-plate type supporting structure

为了克服这一问题,新的四翼梁的设计采用了偏置式结构(图3),即相对的两片支撑梁从直径线上错开一定的距离,这样就形成一对抗扭转的力偶

$$M_{\text{总}} = d * \epsilon * a * E \quad (1)$$

式中  $M_{\text{总}}$  为总的力偶,  $d$  为梁片对称叶片之间偏离的距离,  $\epsilon$  为扭转时叶片的变形量,  $a$  为叶片的截面积,  $E$  为弹性模量.



图3 偏置十字型支撑结构  
Fig.3 Offset crossed type supporting structure

因为  $E$  值通常很大,当  $d$  增大时,扭转刚度得到很大的提高.对图4计算表明,  $\theta$  为  $1.13^\circ$ ,结构谐振频率平方值就会增大一倍<sup>[3]</sup>.这对于提高空间相机的性能十分有利.

除了四翼梁结构的改进外,有的相机还将支持四翼梁的大圆环改为正方形外圈,这样正方形外圈与四翼梁的叶片组成了四个结构非常稳定的三角形,从而增加镜筒的稳定性.大型的次镜支架中正常时使用碳纤维复合材料.

## 2 设计实例

某台空间高分辨率相机,口径为 650 mm,次镜口径为 120 mm.结构设计应考虑加工方便,即工艺性好.这就要求从选择材料上下功夫,也要从设计的结构形式上下功夫.设计的工艺性好坏也直接与功能成本有关,良好的加工性能也必然符合最低成

本准则.经过对比分析各种结构材料,最终选取 TC4 作为次镜支架的首选材料.主要是因为 TC4 具有以下突出的优点:比强度高、抗腐蚀,能在较高温(500℃)和较低温度下使用;密度较小,约为钢的 0.56 倍;膨胀系数约为铝的 1/3;重要的是 TC4 在航天产品中已多次使用,工艺成熟、质量稳定,与碳纤维复合材料镜筒有很好的兼容性,避免产生电化学腐蚀.按照总体的要求,次镜支架的一阶谐振频率大于等于 300 Hz,以避免与其他系统发生共振,并且希望尽量提高轴向刚度.这里主要讨论一阶振动频率,对二阶以上仅作参考.

相机的次镜支架选取经典的四翼梁结构,支架的四个叶片中心对称成十字分布,由光学设计计算知道,支撑次镜的十字架结构宽度增加 1 mm 中心遮拦就会增加近 3 mm,因此需严格控制叶片的宽度.叶片在厚度方向与入射光线平行,不会产生附加的遮拦,因此在厚度上尺寸可略放松.根据振动学原理,一阶模态应该出现在系统最薄弱处,因此可以推测支架的薄弱处在于抗扭转刚度.在次镜支架设计中,我们要找到具有高刚性的最佳结构形式,首先对支架整体进行模态分析.利用有限元分析软件 SAP95 进行模态分析.通过模态分析,得到了该相机次镜支架的固有频率和振形.模态和相应振形则可以帮助我们发现薄弱环节.初始设计的次镜支架为传统的四翼梁结构,叶片宽度 3 mm,厚度 10 mm(称为结构1),其1阶模态和振型如图4,一阶模态的固有频率为 70 Hz,振型显示出扭转刚度较弱,从而证实了原先的判断.其刚度不能满足设计要求.

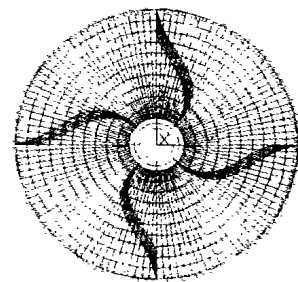


图4 结构1的1阶模态  
Fig.4 The first mode of structure 1

为了提高刚性,将叶片的宽度增加为 5 mm,厚度增加到10 mm(称为结构2),重新分析模态.图5(a)、(b)、(c)分别为第一、二、三阶频率和振型.

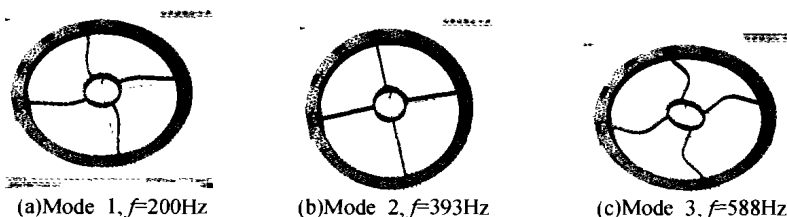


图5 结构2前三阶模态  
Fig.5 The first three modes of structure 2

一阶振型为扭动,二阶振型为轴向振动,三阶为呼吸振动.

将叶片偏置至内环切线方向(称为结构 3),一阶频率为 355 Hz,振型为轴向振动. 二阶频率为 429 Hz,振型为扭动,见图 6. 可见采用偏置结构后,支架的振动基频大大提高了.

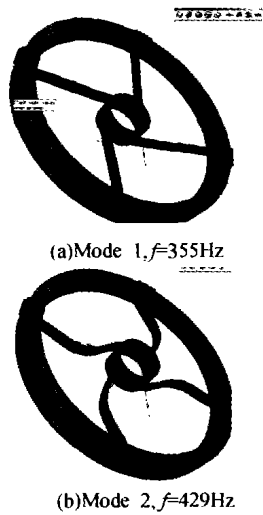


图 6 结构 3 的前二阶模态  
Fig. 6 The first two modes of structure 3

为了提高次镜支架轴向的刚度,在上述理论的指导下对结构 3 进行了细化设计. 先对四个叶片形状进行了优化,将四个叶片设计成弧形,以提高轴向

的刚度. 同时,叶片设计成弧形也可以缩短主镜筒的长度,既减轻了镜筒的重量,又提高了刚度. 第三,优化了四个叶片的位置设计. 四个叶片与内环相切,不但提高了次镜支架的谐振频率,而且有利于机械加工. 因为在加工内环端面时,机床刀具切削力是沿着内环的切线方向的. 因此,沿切线布置叶片,可以有效的抵抗切削力,减轻加工时产生的颤,从而保证加工质量. 图 7 是该相机次镜支架的立体图(称为结构 4).



图 7 结构 4 的立体图  
Fig. 7 3 dimensions map of structure 4

图 8 是叶片宽度 5 mm 时的前三阶模态,一阶频率达到了 343 Hz,二阶频率 397 Hz,三阶频率 402 Hz,振型都表现为不同形式的扭转. 可见采用偏置式结构大大地提高了次镜支架的刚度. 结果表明,次镜支架有非常大的刚度裕度,叶片还有进一步减薄的余地. 图 9 中的(a)、(b)、(c)分别是将叶片宽度减少到 3 mm 后的前三阶模态. 一阶频率达到了 315 Hz,二阶频率 422 Hz,三阶频率 435 Hz,振型都表现为不同形式的扭转.

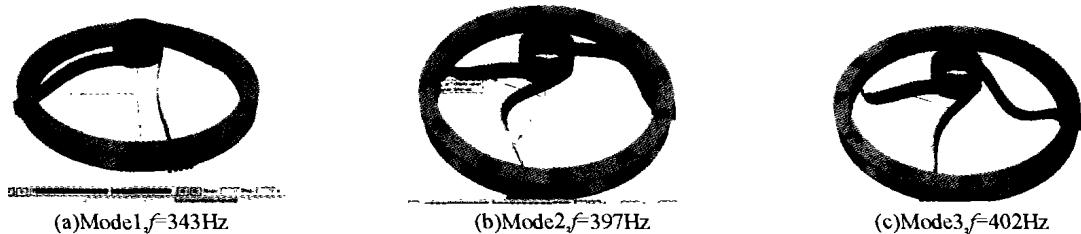


图 8 5 mm 叶片宽度的模态  
Fig. 8 The modes of 5 mm plate

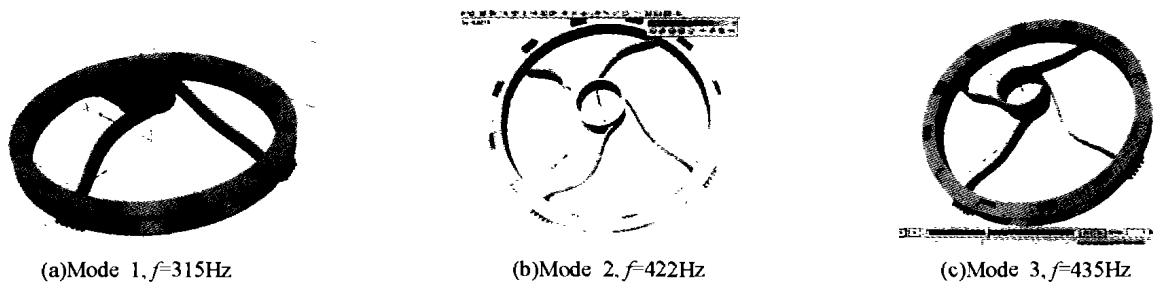


图 9 叶片宽度 3 mm 模态  
Fig. 9 The modes of 3 mm plate

### 3 结论

从分析和设计实例中可以看出,鼓型偏置式的四翼梁结构能够有效地提高次镜支架的扭转刚度和轴向刚度,有利于减小光学系统的中心遮拦,且减轻了系统的重量. 实际加工出的产品也验证了上述设计的合理性. 在有限元分析的过程中,也发现支架

与主镜筒之间的联接方式对支架的刚度有很大的影响,为了保证刚度,建议在实际工程中使用配合螺栓进行可靠的联接.

### 参考文献

- 1 陈荣利,樊学武. 高分辨率 TDICCD 相机轻量化技术. 航天返回与遥感,2003,24(2):20~24  
Chen R L, Fan X W. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003,24(2):20~24

- 2 丁福建,李英才. 卡塞格林反射系统结构动态优化设计. 光子学报,1999,28(8):756~762  
Ding F J, Li Y C. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(8):756~762
- 3 程景全. 天文望远镜原理和设计. 北京:中国科学技术出版社,2003. 103~104  
Cheng J Q. *The Principle & Design of Space Telescope*. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2003. 103~104
- 4 季文美,方同,陈松淇. 机械振动. 北京:科学出版社,1985  
Ji W M, Fang T, Chen S Q. *Mechanism Vibration*. Beijing: Science Press, 1985
- 5 程景全,李国平. 四翼梁式十字形中心支承的力学特性. 天文仪器和技术,1998,(1):5~10  
Cheng J Q, Li G P. *Chronometer Instrument & Technology*, 1998,(1):5~10

## Design of Bracket Structure for the Second Mirror of Space High Resolution CCD Camera

Chen Rongli, Zhang Yukang, Fan Xuewu, Ma Zhen, Li Yingcai

*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy Sciences, Xi'an 710068*

Received date:2003-08-12

**Abstract** According to the structural design scheme for a high resolution space CCD camera, the structural analysis model of bracket structure for the second mirror is established by means of the structure design software Solidedge. The natural frequency and the first three vibration modes of different types and various dimensions bracket structure for the second mirror are analyzed by means of FEA software Vnastran. Then, an offset bosomed cross structure for supporting secondary mirror is proposed. The structure has a higher resonance frequency and fine cutting property so it can be applied to large aperture space telescope.

**Keywords** High resolution; CCD camera; Bracket structure; Second mirror; FEA



**Chen Rongli** was born in 1973, in Shaanxi province, China. He received the Master degree in 1999 from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Now, he is working as a Ph. D. candidate at Space Optics Lab. His major is space optical remote. He has been a vice professor since 2004.