

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.06.007

高分辨率空间相机星载接口设计*

冯 强^{1,2}, 何 欣^{1*}, 吕清涛³, 张 凯¹, 赵宇宸¹

(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. 中国科学院大学 大珩学院, 北京 100049; 3. 上海天茗信息科技有限公司, 上海 201499)

摘要:针对高分辨率空间相机热稳定性和力学特性存在的问题,对星载接口的约束、热适应性、力学性能等方面进行了研究,提出了一种基于运动学支撑的柔性星载接口。根据某卫星结构要求,确定了空间相机的卧式 4 点连接布局方案,并对星载接口开展了热适应设计,引入了柔性环节结构,通过螺旋理论验证了约束的准确性;以随机振动响应最小为目标,优化了柔性环节,得到了柔性环节的关键尺寸参数;采用有限元软件,对星载接口性能进行了仿真分析。研究表明:该星载接口结构满足约束要求,既能保护空间相机结构免受发射段的剧烈振动,又保证了其在轨工作时良好的热适应性。

关键词:高分辨率空间相机;星载接口;环境适应性;螺旋理论;优化设计

中图分类号:TH703.3;TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)06-0590-06

Support structure for high resolution space camera

FENG Qiang^{1,2}, HE Xin¹, LV Qing-tao³, ZHANG Kai¹, ZHAO Yu-chen¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Daheng Institute, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Tianming Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201499, China)

Abstract: Aiming at the problem of thermal stability and mechanical properties of high resolution space cameras, the constraint, thermal adaptability and mechanical property of the support structure were researched, and a flexible support structure based on kinematic support was proposed. The layout scheme of 4-point horizontal connection between space camera and satellite was determined by the structure of the satellite, and the thermal adaptation design of the support structure was carried out. The structure with flexible link was designed which was verified by the screw theory. To achieve the lower random vibration response, the flexible link for support structure was optimized. The key size parameters of the flexible link were obtained. The finite element analysis software was used to simulate the performance of the support structure. The results indicate that the support structure satisfies the constraint requirements. It can not only protect the structure of the space camera from severe vibration damage during the launch process, but also achieve robust thermal adaptability in orbit.

Key words: high resolution space camera; support structure; environment adaptation; screw theory; optimization design

0 引 言

随着空间遥感技术的发展,高分辨率成像的空间遥感相机已成为世界航天领域的研究热点。星载

接口组件是空间相机有效载荷与卫星平台的连接部分,起到支撑、定位空间相机,保护相机结构在发射段免受剧烈振动造成破坏,防止外界环境扰动影响相机精度及成像质量,是空间相机的重要组成部分

收稿日期:2019-01-04

基金项目:国防科技工业局重大科技专项资助项目(GFY101-6)

作者简介:冯强(1995-),男,吉林白城人,硕士研究生,主要从事空间遥感相机光机结构设计方面的研究。E-mail:fengq9542@126.com

通信联系人:何欣,男,硕士,研究员。E-mail:hexinp@163.com

分^[1-2]。

许多研究机构对星载接口开展了研究。薛闯等人^[3]基于挠性结构原理设计了双脚架柔节机械接口,通过提高相机整机基频解决了相机结构受卫星平台作用的变形问题;高明辉等人^[4]对比分析了3种不同的安装座结构,认为平动式安装座可以更好地解决空间相机的变形问题;马聪等人^[5]采用“一个刚性支座+两个平动支座”的结构方案,有效释放了安装平面内的应力和变形。上述结构或是一一定程度上减弱振动载荷的扰动作用,或是解决了在轨工作的变形问题,但难以满足高分辨率空间相机的高成像质量需求。

针对某空间相机高对地观测分辨率要求、大视场成像要求,本文设计一种全新的星载接口结构方案,通过约束螺旋理论以验证空间相机自由度约束的准确性,并采用有限元方法以验证星载接口结构的性能。

1 星载接口设计要求

某高分辨率空间相机光学系统对结构可靠性要求较高,针对星载接口结构的具体要求如下:

- (1) 满足运动学约束,符合静定约束要求;
- (2) 相机光轴在轨指向稳定性优于 $\pm 10''$;
- (3) 可以适应卫星舱板与空间相机连接面最大温差 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况;
- (4) 空间相机整机基频不低于 60 Hz ;
- (5) 在 10 g 过载条件下,星载接口结构强度保留3倍以上安全裕度;
- (6) 星载接口总质量不大于 5 kg 。

2 星载接口设计

星载接口设计包括星载接口布局设计、消热化设计、结构设计、材料选取等方面。本文设计一种全新的星载接口组件,既可以保护相机结构免受剧烈的振动破坏,又能解决温度载荷剧烈变化对空间相机造成破坏,同时实现相机的准确定位约束,保证相机的成像质量。

2.1 星载接口布局设计

空间相机与卫星平台连接有立式、卧式之分。卧式安装可以降低空间相机的重心,在不增加质量的情况下提高整机基频,避免低频振动环境对相机造成破

坏,故本文采用卧式安装。同时,为保证星载接口给相机提供良好的力学环境,本文在相机底面的4角分别布置星载接口结构,可以在约束相机时拥有最大的等效连接面积和最长的力臂,获得最佳的约束效果。但4点连接方式可能产生过约束^[6],需要结合具体4个接口结构形式进行运动学分析。

空间相机与卫星平台连接形式如图1所示。

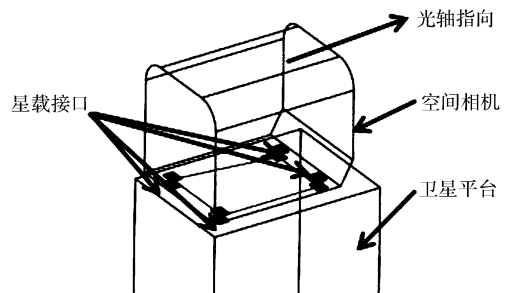


图1 空间相机与卫星平台连接方式

2.2 星载接口热适应性设计

本文星载接口设计的难点在于:有效减弱外界热环境变化对空间相机结构的影响、保证空间相机光轴指向、保护结构免受振动破坏。

在轨工作阶段,高分辨率空间相机具有严格的工作温度要求,而卫星平台温度变化范围较大,二者之间的温差最大可达 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当卫星平台温度升高,卫星舱板受热发生膨胀,星载接口安装点随之变化,此时星载接口与空间相机连接的一端温度基本没有变化。两端的温度差引起卫星舱板和空间相机的接口安装点位置变化,星载接口结构自身会发生倾斜来适应。星载接口刚度较大时,带动空间相机随之变形,光学组件安装位置变化,引起光轴指向漂移。

高分辨率空间相机卧式安装跨距较大,安装点微小的位移容易引起相机光轴指向超差。传统运动学接口结构通常由多层铰链复合组成,存在配合有间隙、铰链的装调和间隙的控制困难问题,不利于保持光轴指向。连续体的结构有利于解决上述问题,因此,采用柔性环节模拟代替铰链结构,通过在星载连接面内产生较小的位移代替倾斜转动。

柔性环节在外力作用下产生变形,单一的柔性结构只能实现角度的偏移,2个以上的柔性环节共同作用可以实现某方向上的位移。因此,星载接口结构采用2个以上的柔性环节串联使用,通过控制位移量设计,满足空间相机星载接口的热适应性。

假定空间相机整机刚度分布均匀,空间相机质心位置为膨胀中心点,对星载接口结构进行消热化设计。

当卫星舱板温度升高时,空间相机前侧的两个星载接口沿光轴方向和垂直光轴方向产生等量的位移,后侧的两个星载接口结构沿其与质心连线方向产生等量的位移,如图 2 所示。

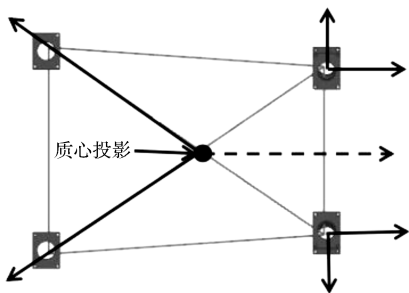


图 2 星载接口热适应方向

星载接口在星载连接面产生位移时,相机质心会在高度方向有所下降。通过设计空间相机星载接口结构受温差作用产生的位移量,可使相机质心在星载连接面内的投影保持不变,保证相机光轴方向不发生角度偏移。

2.3 星载接口结构设计

本研究采用带有柔性环节的星载接口结构,替代传统的运动铰链结构,避免了铰链间配合间隙的存在,力学环境试验时不会出现冲击现象。同时,因结构件数量减少,提升了结构可靠性、稳定性。

本研究借鉴柔铰设计原理^[7-9],根据上述热适应性要求,初步设计星载接口结构形式,如图 3 所示。

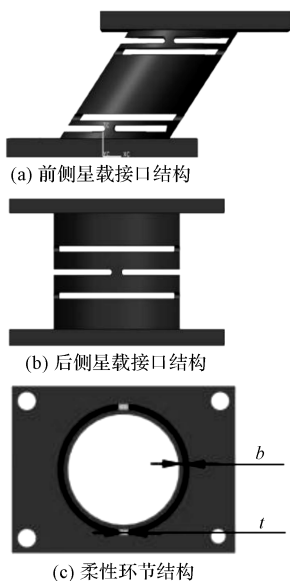


图 3 星载接口结构三维模型

根据图 2 可知:

在卫星舱板膨胀变形时,前侧两个星载接口沿平行和垂直光轴方向产生位移,因此,本研究在两个方向上分别设计 2 个柔性环节。考虑星载接口结构受力情况,每个结构在上、下端对称设计了两层互相垂直的柔性环节。互相垂直的 2 个柔性环节可以等效为一组铰链结构,每个接口可以等效为一根 2 力杆。对于后侧星载接口结构,设计了 2 层沿质心连线方向的柔性环节以适应温度变化,并在两层柔性环节间设计 1 层垂直质心连线方向的柔性环节。该接口结构方案设计可以实现静定约束要求。

星载接口组件是空间相机的力学环境输入端,柔性环节容易产生应力集中,所以星载接口结构需要具有较高的机械强度。

本文选用牌号 TC4 的钛合金^[10]材料制造星载接口,TC4 材料性能如表 1 所示。

表 1 TC4 材料性能

密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	线膨胀系 数 $\alpha/(10^{-6}$ $\cdot K^{-1})$	泊松 比 μ
4.4	109	445	895	9.1	0.34

2.4 静定约束验证

高分辨率空间相机定位必须遵循静定约束原则,欠约束无法保证指向稳定,过约束会产生应力影响相机成像质量。本文采用约束螺旋理论进行了星载连接方案的约束设计。

2.4.1 约束螺旋理论

空间运动副都可以使用螺旋系 $\$$ 来表示,对应的约束系可以由反螺旋系 $\r 表示,例如节距为 0 的螺旋代表螺旋系的转动副、反螺旋系中的约束力。螺旋是节距 h 通常不为 0 的线矢量,由正交的矢量 S 与线距 S_0 确定了螺旋的具体位置和指向。

Plucker 表达式如下:

$$\$ = (S; S_0) = (S; r_0 \times S) = (l, m, n; s, t, u) \tag{1}$$

通常情况下,有:

$$\$ = r_0 \times S + h \times S_0 \tag{2}$$

传统的 Kutzbach-Grubler 公式较难求解空间机构的自由度,容易造成结构自由度计算失败。结合约束螺

旋理论,对 K - G 公式进行修正,即:

$$M = (6 - r)(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - s \quad (3)$$

$$r = \text{rank}(\hat{\$}^T) \quad (4)$$

$$v = t - k \quad (5)$$

式中: M — 空间机构的剩余自由度; r — 公共约束数; n — 机构构件的数目; g — 运动副的数目; f_i — 运动副 i 的自由度数目; s — 局部自由度数; v — 冗余约束的数目。

公共约束之外的 t 个约束可能形成冗余约束,当 t 个约束形成 k 系螺旋,多余的 $(t - k)$ 个螺旋为冗余约束。

2.4.2 验证计算

本文设计的星载接口结构由多层柔性环节复合,在运动学分析中,将柔性环节简化为转动副。根据前后 4 个接口结构形式的不同,通过螺旋理论对星载连接方案进行分析。

星载接口上、下连接面均共面安装,连接空间相机与卫星平台。在运动学上,下层连接卫星平台的各个构件均视作机架,上层连接空间相机的视作一个连杆,因此共有 12 个构件。分析 4 个星载接口结构的螺旋约束系,共有 10 个有效的螺旋表达式,构成了 6 系螺旋,因此共有 4 个冗余约束,根据修正的 K - G 公式有:

$$M = (6 - r)(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - s = 6 \times (12 - 14 - 1) + \sum_{i=1}^{14} 1 + 4 - 0 = 0 \quad (6)$$

计算结果表明:该星载接口连接方式实现了自由度全约束且无过约束。

2.5 星载接口结构优化

随机振动是发射阶段的主要振动形式。引入柔性环节,可以减弱振动载荷耦合的影响,保证空间相机成像质量。本研究选定星载接口柔性环节的最小厚度、宽度作为优化目标,使结构在保证强度的基础上,满足相机动力学要求。

2.5.1 优化模型

本研究以星载接口结构的柔性环节厚度、宽度为优化变量,以相机关键位置总加速度响应均方值最小为优化目标,以整机基频、星载接口组件体积分数为约束条件的模型,对柔性环节进行尺寸优化设计。

优化模型如下:

$$\text{Find: } \mathbf{T}' = (t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n)^T$$

$$\mathbf{B}' = (b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m)^T$$

$$\text{Minimize: } C(x) = \sigma_{yy}^2$$

$$\text{Subject to: } V(x) = fV_0 \leq V^*$$

$$\omega_1 \geq 60$$

$$1 \leq t_i \leq 10$$

$$3 \leq b_j \leq 10 \quad (7)$$

式中: σ_{yy} — 加速度响应均方根值(RMS); t_i — 柔性环节厚度; b_j — 柔性环节的宽度,也是接口结构的壁厚; V_0 — 星载接口结构的初始体积; f — 体积系数; ω_1 — 整机基频。

2.5.2 结构优化结果

根据工程经验,本研究在 1 mm ~ 10 mm 区间优化柔性环节的最小厚度, t_i 的初值选为 10 mm,步长为 0.5 mm;在 3 mm ~ 10 mm 区间分析星载接口结构壁厚与相机整机基频的关系, b_j 的初值选为 10 mm,步长为 1 mm。

在保证星载接口结构结构刚度的前提下,经迭代优化出柔性环节最小厚度为 6 mm,柔性环节的宽度为 5 mm,此时星载接口组件总质量为 2.71 kg,整机基频为 76.4 Hz。

3 星载接口结构仿真分析

针对空间相机整机,本研究使用 Hypermesh 和 Msc. Patran&Nastran 建立有限元模型,模型由 Hex、Wedge 和 Shell 3 种单元组成。

3.1 安全裕度分析

在火箭发射过程中,空间相机经历的载荷环境剧烈复杂,会出现过载现象。

本研究借计算 3 个方向过载 10 g 的应力情况,其中, Y 向过载分析结果如图 4 所示。

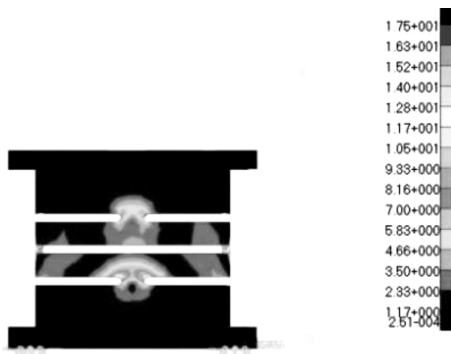


图 4 Y 向过载分析结果

星载接口结构的安全裕度为:

$$M. S. = \frac{\sigma_s/S}{S_e} - 1 \quad (8)$$

式中: $M. S.$ —安全裕度; S —安全系数; S_e —计算载荷。

整理应力结果,并计算安全裕度,计算结果如表 2 所示。

表 2 应力与安全裕度计算结果

方向	最大应力 σ /MPa	安全裕度 $M. S.$
X	18.6	13.3
Y	27.6	8.9
Z	21.9	11.3

从表 2 中可以看出:

最大应力出现在 Y 向过载时,此时最大应力为 27.6 MPa,安全裕度为 8.9。各方向过载情况下,安全裕度均大于 3,满足设计要求。

3.2 模态分析

本研究通过 Msc. Patran & Nastran 软件对整机模态特性仿真分析,相机整机基频为 76.4 Hz,满足设计指标要求。

空间相机第 1 阶振型如图 5 所示。



图 5 空间相机第 1 阶振型

主要的模态分析结果如表 3 所示。

表 3 模态分析结果

阶次	基频 ω /Hz	振型
1	76.4	Y 向
2	87.1	X 向
3	116.0	Z 向

3.3 随机振动响应分析

对于此空间相机随机振动频率范围为 10 Hz ~

2 000 Hz,激励功率谱密度如表 4 所示。

表 4 激励加速度功率谱

频率 f /Hz	功率谱密度 PSD
10 ~ 70	+6 dB/oct
70 ~ 130	0.04 g^2 /Hz
130 ~ 250	0.12 g^2 /Hz
250 ~ 450	0.05 g^2 /Hz
450 ~ 600	0.08 g^2 /Hz
600 ~ 2 000	-15 dB/oct

根据给定条件,本研究借助有限元软件对相机承受的动力学环境进行模拟。

关键采样点随机响应分析结果如表 5 所示。

表 5 关键采样点随机响应分析结果

采样点	加速度响应均方根值		
	X	Y	Z
采样点	6.72	1.71	1.89

3.4 热稳定性分析

本文将反射镜倾角变化和光轴指向变化一起作为相机热稳定性的指标。在有限元软件中,给定整机模型 15 °C 的温升条件,分析温升情况整机的位移情况,分析结果如图 6 所示。

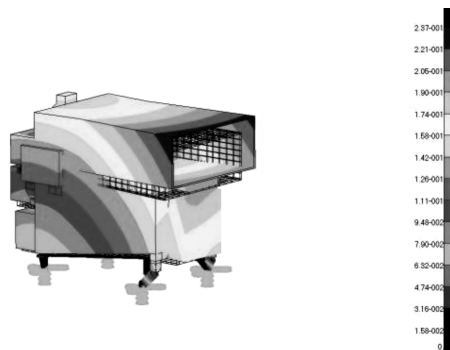


图 6 整机热稳定性分析结果

仿真分析结果表明:

- (1) 星载接口结构的位移方向与设计方向相符;
- (2) 计算空间相机各反射镜受温度载荷的影响情况为:主镜转角变化 3.2",次镜转角变化 4.9",转角总变化量为 8.1",满足光轴指向要求。

4 结束语

根据某高分辨率空间相机对星载接口的要求,本文设计了一种全新的星载接口,整机基频为 76.4 Hz,接口总重量为 2.71 kg。本文对柔性环节重要参数进行了优化;借助有限元分析软件对结构进行了模态安全裕度和热稳定性仿真分析。所设计的星载接口方案满足了静定约束、光轴指向精度和温度适应性的要求,具体如下:

(1)空间相机实现了运动学静定约束,不存在欠约束和过约束的情况;

(2)只有温度变化会对相机光轴指向造成影响,但满足优于 $\pm 10''$ 的稳定性指标;

(3)相机可以适应卫星平台 15 °C 的温度变化;

(4)星载接口在 10 g 过载情况下最大应力为 27.6 MPa,满足 3 倍安全裕度的要求。

参考文献 (References):

- [1] 高洪涛,陈 虎,刘 晖,等. 国外对地观测卫星技术发展[J]. 航天器工程,2009,18(3):84-92.
- [2] 王建永,满益云,傅丹膺,等. 国外高分辨率相机与卫星平台连接方式综述[J]. 航天返回与遥感,2009,30(4):36-

41.

- [3] 薛 闯,颜昌翔. 空间相机主支撑结构设计与分析[J]. 科学技术与工程,2011,11(35):8894-8897.
- [4] 高明辉,郑玉权,郭万存. 高光谱与高分辨率 CO₂ 探测仪安装座结构设计[J]. 红外与激光工程,2014,43(12):3973-3976.
- [5] 马 聪,李 威,张远清,等. 深空探测遥感相机支撑结构设计[J]. 红外与激光工程,2018,47(6):184-189.
- [6] 李志来,薛栋林,张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2485-2490.
- [7] 谭进国,何 欣,付亮亮. 小型反射镜中心支撑技术[J]. 红外与激光工程,2010,39(6):1070-1074.
- [8] CHEN A, CAO F, HOU W. The flexibility calculation of biaxial right circular flexible hinge[J]. **Journal of Basic Science & Engineering**, 2010,18(5):838-846.
- [9] CHOI K B, LEE J J, MIN Y K. Cartwheel flexure based compliant stage for large displacement driven by a stack-type piezoelectric element[C]. International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul: IEEE, 2007.
- [10] 李 畅,何 欣. 基于 Rayleigh 算法的空间相机桁架结构设计及优化[J]. 红外与激光工程,2012,41(9):2405-2409.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

冯 强,何 欣,吕清涛,等. 高分辨率空间相机星载接口设计[J]. 机电工程,2019,36(6):590-595.

FENG Qiang, HE Xin, LV Qing-tao, et al. Support structure for high resolution space camera[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(6):590-595.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>