

离轴三反空间相机与卫星平台的优化连接方式

沙巍, 陈长征, 李丽富, 张帆

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 对于与卫星平台卧式安装的长焦距离轴三反空间相机, 由于地面与在轨状态环境条件不同引起平台接口与相机产生温度差, 导致相机视轴漂移影响成像质量。为解决此问题, 提出了将柔性连接座、刚性连接座和可解锁连接座配合应用的优化连接方式, 实现了相机与平台在轨状态 3 点静定柔性连接, 并在运载阶段利用可解锁连接座提高相机基频。利用有限元方法对优化连接方式进行验证, 平台接口温度降低 15℃引起次镜角度变化为 9.62"(安装位置跨距 1.2 m), 满足光学设计要求; 同时运载阶段相机在 X、Y、Z 三方向频率响应基频分别为 120 Hz、120 Hz、110 Hz, 与全刚性连接情况相比无明显降低。利用试验工装模拟平台进行温度变化替代试验, 平台在温度提高 15℃情况下, 试验结果与仿真结果相符, 且次镜转角实测值与仿真结果最大误差为 9%。试验结果说明优化连接方式解决了卫星平台与相机在轨状态温度差引起的视轴漂移的问题, 提高了相机的在轨环境适应性。

关键词: 离轴三反空间相机; 卧式安装; 视轴漂移; 环境适应性

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1526-08

Optimized connection method of TMA space camera and satellite platform

Sha Wei, Chen Changzheng, Li Lifu, Zhang Fan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: For long-focus TMA space camera that connect to satellite platform horizontally, the connecting interface temperature difference between satellite platform and space camera is generated due to the alternation of ground test and in-orbit condition, leading to the line-of-sight drift of the space camera which effects imaging quality. In order to solve this problem, the optimized connection method that applying flexible connector, rigid connector and releasable connector cooperatively was proposed. The space camera was flexibly and statically determinate installed on satellite platform in orbit, and the connection stiffness was enhanced by two additional releasable connectors in launching stage so that the fundamental frequency was ensured. The optimized connection method was verified by finite element method, the secondary mirror angular deviation caused by satellite platform temperature decreasing 15℃ was 9.62"(the span of installation locations was 1.2 m), which satisfied the optical tolerance. In launching stage, the fundamental frequency of space camera in X, Y, Z directions was 120 Hz, 120 Hz, and 110 Hz, there was no significant decreasing compared with rigid connection. The alternative experiment of

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-10-03

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 沙巍(1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事空间相机光机结构优化设计方面的研究。Email: sha.phe@gmail.com

platform temperature ascending $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ was performed via experiment fixture, the test result was consistent with the simulation, the maximum relative error of secondary mirror angular deviation between measurement and simulation was 9%. The results show that the problem of line-of-sight drift caused by satellite platform and space camera temperature difference is solved by optimized connection method, and in-orbit environment adaptability of camera is improved.

Key words: TMA space camera; horizontal type installation; line-of-sight drift; environment adaptation

0 引言

长焦距离轴三反空间相机可以同时满足高分辨率和高覆盖宽度,被广泛应用于资源普查、防灾减灾和军事侦察领域。随着对分辨率要求的提高,光学系统的焦距也相应增大,引起相机总长度增加。对于与卫星平台直接对接安装^[1]的离轴三反空间相机,与平台的安装方式通常为立式,即相机光轴指向与接口面基本垂直,如 Landsat5。长焦距离轴三反空间相机由于总长度较大,立式安装时重心偏高,相机基频较低,难以满足运载阶段振动环境要求。若要提高相机基频,则需要增加一定重量提高结构刚度,这样又给运载系统增加了难度,违背了整体优化设计的宗旨。如果相机采用卧式安装,即相机光轴方向平行于接口面,能降低相机重心,以达到不增加相机重量的前提下提高基频的目的。

在地面装调和试验时,空间相机和卫星平台工作温度都为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的室温^[2];在轨状态下,相机由于对温度比较敏感,要求的工作温度保持在 $20\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,平台则无需保持此温度,工作温度范围为 $5\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,即相机与平台温差最大为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。接口面温度差将引起平台与相机的连接接口相互作用产生变形,卧式安装的长焦距离轴三反空间相机,安装点跨度大,相机视轴方向刚度较低,平台与相机在轨温度差影响相机光机结构,造成各反射镜的刚体位移和角度变化^[3],引起视轴漂移。视轴漂移会引起光学系统传函下降,甚至光学系统无法成像。

对于离轴三反空间相机与卫星平台因为在轨温差引起的视轴漂移问题,提出了优化连接方法:在运载阶段以 5 安装点与平台超静定刚性连接,入轨后解锁两刚性安装点实现相机与平台 3 点静定柔性连接。优化连接方法降低了在轨状态相机与平台的连

接刚度,使在轨温度差对相机光机结构影响减小;运载阶段刚性连接保证了相机较高的基频,避免与激励频率耦合对光机结构造成不利影响。

1 卫星平台温度变化对光机结构的影响

1.1 安装方式

离轴三反空间相机与卫星平台 3 点静定连接,如图 1 所示,其中(a)为立式安装,(b)为卧式安装,对

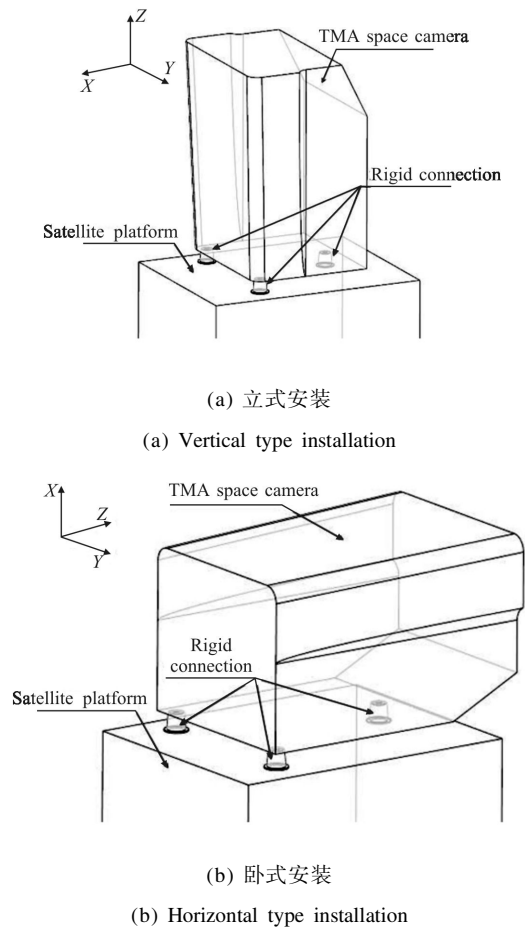


图 1 离轴三反空间相机与卫星平台连接方式

Fig.1 Connection method between TMA space camera and satellite platform

于长焦离轴三反空间相机, 较低的质心位置有利于运载阶段基频的提升, 故应选用卧式安装方式。平台与相机的安装面为铝蜂窝板, 相机主支撑结构主要选用铝基复合材料(SiCp/Al)^[4]。为了降低平台热传导对相机温度分布的影响, 相机与平台的连接座通常选用导热率非常低的钛合金或殷钢, 并通过聚酰亚胺垫片进行隔热安装。在平台和连接座温度发生变

化时, 相机主支撑结构由热控系统保持温度稳定, 不发生形变; 平台和连接座所用材料线胀系数差异较大, 相同温度变化下平台安装面变形更大, 对相机施加 Y 方向(即相机偏流方向)的弯矩。对于长焦距离轴三反空间相机, 在弯矩作用下保证光机结构稳定, 各反射镜刚体位移和转角都在设计公差范围内是比较困难的。空间相机常用结构材料如表 1 所示。

表 1 材料属性

Tab.1 Material properties

Material	Satellite platform	Connecting base		Thermal insulating gasket	TMA space camera	
	Aluminum honeycomb	TC4	Invar	Polyimide	High reinforcement content SiCp/Al-Si composite	Low reinforcement content SiCp/Al-Si composite
Elasticity modulus E/GPa	70	114	141	4	180	100
Linear expansion coefficient $\alpha(10^{-6}/\text{K})$	22.50	9.10	0.65	1.00	8.00	16.00
Heat conductivity coefficient $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{k})^{-1}$	167.0	7.4	13.7	0.3	225.0	155.0

1.2 入轨前后温度差对光机结构影响

入轨前后卫星平台温度降低 ΔT , 引起相机和平台安装点位置变化, 影响相机光机结构, 如图 2 所示。为了简化计算, 对相机结构做出以下假设:

(1) 相机整体刚度分布均匀。

(2) 卫星平台温度变化引起相机两端安装点位置变化相同(均为 ΔL)。

(3) 相机弧矢方向(即偏流方向)刚度较高, 温度变化引起影响可忽略。

(4) 主镜和次镜, 三镜和折叠镜距离安装面高度相等。

(5) 各反射镜角度变化近似相等, 即 $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta_3 \approx \theta_4 = \theta$ 。

由于反射镜在温降前后角度变化 θ 很小, 所以认为 $\sin \theta = \tan \theta = \theta$, 根据图 2 中的各反射镜之间的关系, 有:

$$\theta = \tan \theta = \frac{2\Delta L}{H}$$

光学系统后工作距变化 ΔWD 为:

$$\Delta WD = 2H_2 \sin \theta + 2 \left(\frac{1}{2} H - H_1 \right) \sin \theta = (H + 2H_2 - 2H_1) \theta$$

如果令 $H_1 = H_2$, 则:

$$\Delta WD = H \cdot \frac{2\Delta L}{H} = 2\Delta L$$

相机的结构总刚度要优于平台, 假设刚度比为 $E_{\text{相机}}:E_{\text{平台}} = \varepsilon$ 。在平台温降条件下, 由平台引起的相机变形量根据刚度比确定, 为:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1+\varepsilon} \cdot \alpha_0 \cdot \Delta T \cdot L$$

所以:

$$\theta = \frac{1}{1+\varepsilon} \cdot \frac{\alpha_0 \cdot L}{H} \cdot \Delta T$$

$$\Delta WD = \frac{1}{1+\varepsilon} \cdot \alpha_0 \cdot \Delta T \cdot L$$

式中: H 为相机总体高度; H_1 为三镜和折叠镜与安装面的距离; H_2 为主镜和次镜与安装面的距离; L 为相机总体长度; α_0 为卫星平台蜂窝板的线胀系数, 蜂窝板主要材料为铝, 所以 α_0 可取铝的线胀系数^[5]。平台温度降低后, 反射镜角度变化 θ 与相机的长高比和温度差 ΔT 成正比, 焦距变化 ΔF 与相机总长和温度

差 ΔT 成正比。

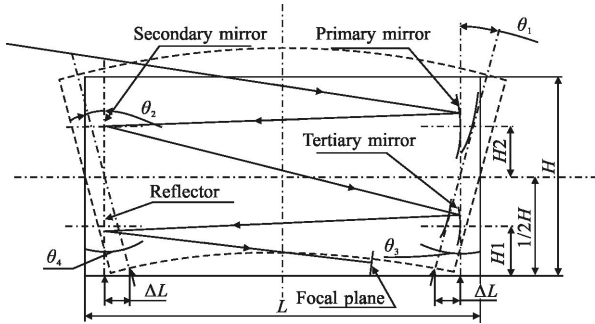


图 2 卫星平台温变对光机结构影响

Fig.2 Influences of satellite platform temperature change on optical-structure

设相机总长度 2 m,总高度为 1 m,各反射镜转角的允许范围如表 2 所示,折叠镜为平面反射镜,所以对角度公差提出要求。取相机与平台的刚度比为 4:1,平台温度变化对相机后工作距变化 ΔWD 和反射镜角度变化 θ 的关系如表 3 所示。

表 2 反射镜转角设计容差

Tab.2 Angular deviation tolerance of mirrors

Mirror	Angular deviation tolerance/(°)		
	R_x	R_y	R_z
Primary mirror	10	10	-
Secondary mirror	15	15	-
Tertiary mirror	15	15	-

表 3 卫星平台温度变化影响

Tab.3 Influence of satellite platform temperature change

Temperature variation/°C	$\Delta WD/mm$	$\theta/(^{\circ})$
5	0.045	9.28
10	0.009	18.57
15	0.135	27.85
20	0.180	37.13

卫星平台温度降低 15°C 的条件下, $\Delta WD=0.135\text{ mm}$,

可以通过调焦机构调节;反射镜角度变化 $\theta=27.85^{\circ}$, 远超出了允许范围,而反射镜角度变化无法调整,产生的视轴漂移则会直接导致系统传函下降,不能满足成像需求。

为了便于推导出 ΔWD 和 θ 随卫星平台温度降低的变化趋势,作出了相机整体刚度均匀分布,且各反射镜角度变化相等的假设。在实际工程中,由于光学设计的原因,各反射镜的几何尺寸和质量有较大差别,最大的反射镜的质量可以达到最小反射镜的 10 倍以上,相应的主支撑结构刚度也并非均匀分布,在刚度较低的次镜/折叠镜端,两反射镜的角度变化 θ 更大。相机和平台的刚度比需根据相机结构和平台安装接口形式,通过仿真分析或试验确定,在计算 ΔWD 和 θ 时,相机和平台的刚度比 ε 取为 4,实际情况中,相机主支撑结构材料的弹性模量是平台安装面选用材料的两倍以上,且相机的结构刚度也大于平台,因此 ε 可能大于 4,计算得到的结果比实际情况更为理想。

2 优化连接方式

离轴三反空间相机卧式安装产生反射镜角度变化超差的原因是连接刚度大,相机在视轴方向的抗弯刚度较小。要增加相机的抗弯刚度,不可避免要增加一部分重量,与结构优化设计的原则相悖,而将相机与卫星平台的连接刚度降低,可以在不改变相机结构的情况下解决此问题。

降低相机与平台连接刚度是指相机在轨 3 点静定连接情况下,将位于次镜/折叠镜端的相机连接座设计为具有单方向柔性的连接结构,平台温度降低时,对相机的弯矩使柔性连接座变形而避免对相机光机结构造成大的影响。

在运载过程中,柔性连接难以满足此阶段严苛的力学环境。为了提高运载阶段的连接刚度,在相机的次镜/折叠镜端增加两刚性安装点,实现 5 安装点的刚性超静定连接,使相机基频提高而避免因低频激励引起破坏。在卫星入轨后,对这两个刚性安装点解锁,实现在轨 3 点静定柔性连接。解锁安装点可以通过使用可解锁连接与分离装置进行,如爆炸螺栓、解锁螺栓、半螺母连接锁和双齿条连接锁等^[6]。优化连接方式如图 3 所示。

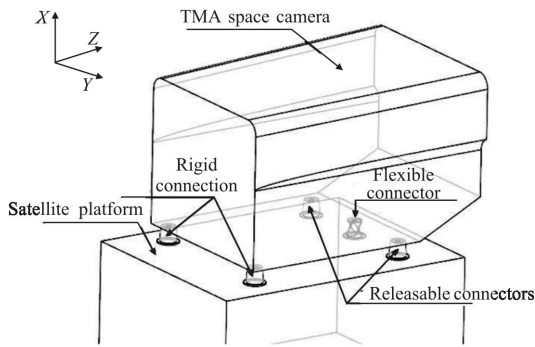


图 3 优化连接方式

Fig.3 Rigid-flexible connection

3 柔性连接结构

对于某长焦距离轴三反空间相机,相机总长达 2 m,总高 1.2 m,光学设计对各反射镜角度变化的要求见表 2。根据相机结构特点和整体尺寸,依据柔性铰链设计原理^[7-10],设计得到柔性连接座,如图 4 所示。为了在刚度不变条件下尽量减少重量,连接座内部有多个轻量化孔,利用理论分析方法难以得到精确的结果,所以采用有限元方法对问题进行求解。

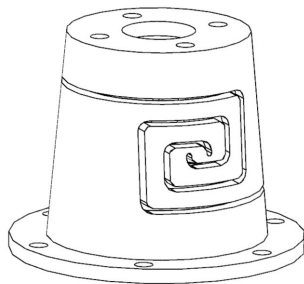


图 4 柔性连接座

Fig.4 Flexible connector

3.1 在轨温度变化仿真验证

在轨状态下,离轴三反空间相机与卫星平台三点柔性静定连接,平台温度变化 15℃,通过有限元方法计算得到各反射镜角度变化,将此结果与同样工况下的三点刚性静定连接方式计算结果进行对比,如表 4 所示,其中 R_x 是反射镜相对于原位置的角度变化, ΔR_y 是以主镜为基准的各反射镜相对角度变化。光学系统整体的刚体位移和角度变化对成像不产生影响,所以各反射镜角度变化公差对应的是相对角度变化 ΔR_y 。

参照表 2,可以发现在刚性连接情况下,卫星平台温度降低 15℃,使次镜转角变化 45.65",大幅超过

设计公差;优化连接情况下,次镜转角变化 9.62",约为刚性连接的 1/5。分别计算两种情况下光学系统 MTF 曲线,与原始光学设计相比(图 5,0.46@71.4),优化连接情况 MTF 曲线(图 6,0.45@71.4)略有下降,而刚性连接情况 MTF 曲线(图 7,0.34@71.4)大幅下降,将对成像质量产生严重影响。

表 4 反射镜转角计算结果

Tab.4 Angular deviation result of mirrors

Mirror	Rigid connection/(")			Optimized connection/(")		
	R_x	R_y	ΔR_y	R_x	R_y	ΔR_y
Primary mirror	0	2.17	0	0	1.61	0
Secondary mirror	0	47.82	45.65	0	11.23	9.62
Tertiary mirror	0	1.44	-0.73	0	1.51	-0.10
Folding mirror	0	99.77	97.60	0	15.76	14.15

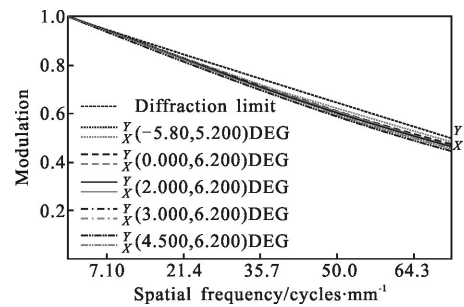


图 5 原始 MTF 曲线

Fig.5 Original MTF

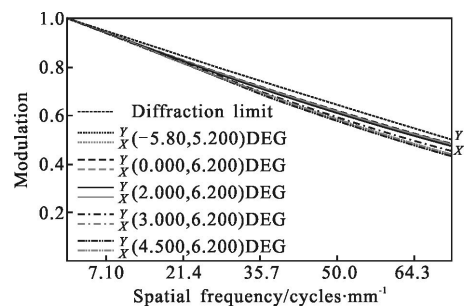


图 6 优化连接 MTF 曲线

Fig.6 MTF of optimized connection

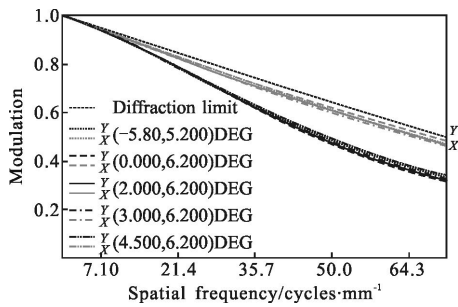


图 7 刚性连接 MTF 曲线

Fig.7 MTF of rigid connection

3.2 频率响应仿真验证

在运载阶段,需要在相机与卫星平台 3 点柔性静定连接的基础上,在次镜/折叠镜端增加两个可解锁连接座,以增加连接刚度。在此条件下,对相机进行频率响应分析,得到 X、Y、Z 三方向的基频。为了进行对比,将 3 点刚性静定连接响应增加两个可解锁安装座,实现五点全刚性连接。计算此工况下相机三方向基频,对比结果如表 5 所示。对比表 5 中两种安装模式下三方向频率响应的计算结果,可以看出优化连接和刚性连接在运载阶段三方向基频和最大响应所在位置基本相同,优化连接下最大响应放大倍数比刚性连接略大。两种连接方式三方向频率响应下的基频均高于 110Hz,远高于平台 30~60Hz 的频率范围,所以优化连接响应放大倍数略高于刚性连接的现象在运载阶段环境条件下不会产生明显影响。

表 5 频率响应结果

Tab.5 Analytical result of frequency response

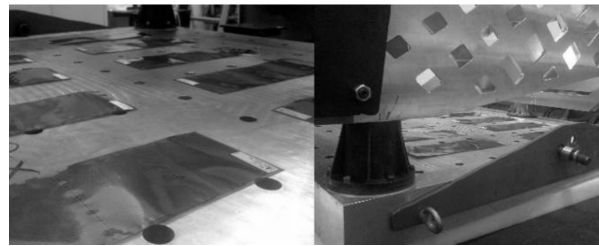
Excitation direction	Rigid connection			Optimized connection		
	Base frequency/Hz	Magnification	Location	Base frequency/Hz	Magnification	Location
X	120	26.71	Primary mirror	120	30.07	Primary mirror
Y	120	5.97	Secondary mirror	120	8.48	Secondary mirror
Z	110	41.49	Tertiary mirror	110	43.32	Tertiary mirror

综合上述计算可以说明,在轨状态下卧式安装的离轴三反空间相机,通过优化连接能有效降低卫星平台温度变化(温度降低 15℃)对相机光机结构造成的影响,使各反射镜的角度变化在允许范围内,同时在运载阶段基频满足环境条件要求。

4 温度变化试验验证

为验证以上结论,需要在实验室条件下对刚性连接和优化连接进行降温对比验证。受试验条件的限制,采用与铝蜂窝板线胀系数相近的铝制工装板代替卫星平台接口,由于在实验室开放环境下对铝工装板制冷,模拟温度降低 15℃ 的难度较高,又考虑到系统结构变形和温度变化为线性关系,所以采用在铝工装板上粘贴加热片并使其温升 15℃ 的方式进行替代试验。

通过控制铝工装板上所贴加热片的功率,使其温度达到 35℃(室温 20℃),实现温升 15℃,如图 8 所示。参加试验的相机为结构样机,其中主体结构主要为铝材料。



(a) 加热片

(b) 连接状态

(a) Heating plates

(b) Assembly condition

图 8 试验条件

Fig.8 Test conditions

4.1 试验状态仿真验证

在试验条件下,由于受条件限制,用铝工装板替代了卫星平台接口,用铝材料结构样机代替实际的铝基复合材料相机,并将试验条件由温降 15℃ 替换为温升 15℃。试验条件与前文的理论推导发生了变化,所以应在试验条件下进行仿真并得到各反射镜角度变化的理论值。在试验条件下的仿真结果如表 6 所示。

表 6 试验条件下仿真结果

Tab.6 Simulation result in experiment condition

Mirror	Rigid connection/(")			Optimized connection/(")		
	R_x	R_y	ΔR_y	R_x	R_y	ΔR_y
Primary mirror	0	-1.94	0.00	0	-2.73	0.00
Secondary mirror	0	-47.44	-45.50	0	-20.57	-17.84
Tertiary mirror	0	-1.29	0.65	0	-2.58	0.15
Folding mirror	0	-103.08	-101.14	0	-30.22	-27.49

4.2 温升 15 °C 试验验证

温升试验中反射镜转角测量原理如图 9 所示,将铝工装板和结构样机连接后置于气浮平台上,在主镜、次镜和三镜背部粘贴反射镜 A、B、C,利用经纬仪和基准反射镜 A'、B'、C'对主镜、次镜和三镜在铝工装板温升 15 °C 的情况下转角进行测量。试验中使用的经纬仪为 Leica TM5100A。铝工装板温升 15 °C 情况下,两种连接方式引起反射镜转角变化如表 7 所示,由于折叠镜没有转角公差要求,所以不对其进行测量。

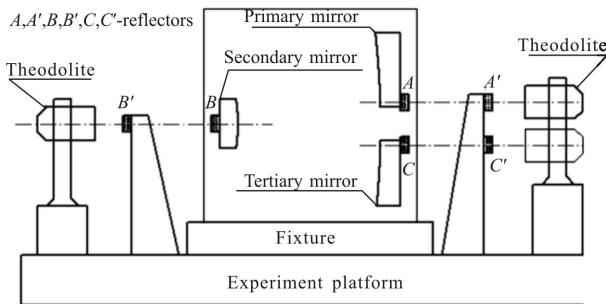


图 9 转角测量

Fig.9 Angular deviation measurement

表 7 试验结果

Tab.7 Experiment result

Mirror	Rigid connection/($''$)		Optimized connection/($''$)	
	R_y	ΔR_y	R_y	ΔR_y
Primary mirror	-1.7	0.0	-2.4	0.0
Secondary mirror	-43.5	-41.8	-22.0	-19.6
Tertiary mirror	-1.5	0.2	-2.3	0.1

由试验结果可以发现:优化连接状态下的次镜转角变化远小于刚性连接状态,与前文的结论相符。Leica TM5100A 经纬仪测角精度为 $0.5''$,显示精度为 $0.1''$,由于空间相机的主镜和三镜转角较小,所以受仪器限制,测量值与仿真结果之间的误差最大为 14.1%;对于转角比较大的次镜,测量值与仿真结果之间的误差最大为 9%。理论分析和试验结果都证明了温度变化 15 °C 情况下,出现转角超差的主要是次镜,主三镜则一般不出现超差,而各情况下次镜转角试验值和仿真值之间的误差均小于 10%,说明仿真方法得到的结论有较高的可信度。由替代试验可以证明

优化连接方式能够解决卫星平台温度下降引起视轴漂移的问题,提高了空间相机的在轨温度适应性。

5 结论

文中提出了离轴三反空间相机与卫星平台卧式安装的优化连接方式。经有限元方法验证,优化连接在卫星平台温度降低 15 °C 的条件下,次镜角度变化 $9.62''$,满足设计公差要求,运载阶段优化连接 X、Y、Z 三方向基频分别为 120 Hz、120 Hz、110 Hz,与刚性连接结果一致。

考虑试验条件限制,采用铝工装板模拟卫星平台的铝蜂窝板,空间相机则采用铝制结构样机,此外由于在实验室环境内进行温降 15 °C 比较困难,又因为整体结构与温度变化具有线性关系,所以对铝工装板粘贴加热片使其升温 15 °C 进行替代试验。试验结果与理论分析得到的结论一致,且次镜转角的试验测量值与仿真值的最大误差为 9%,优于 10%,所以说明仿真结果具有较高的可信度。

优化连接方法解决了长焦距离轴三反空间相机在轨状态下由于卫星平台和相机间存在温度差引起的视轴漂移从而影响成像质量的问题,提高了相机的温度适应性,为长焦距空间相机与平台的连接提供了新方法。

参考文献:

- [1] Wang Jianyong, Man Yiyun, Fu Danying, et al. The summarization of connection ways between foreign high-resolution camera and platform [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(4): 36-41. (in Chinese)
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.
- [2] Yang Wengang, Yu Lei, Chen Rongli, et al. Precise thermal control design and validation for high resolution space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2363-2367. (in Chinese)
杨文刚, 余雷, 陈荣利, 等. 高分辨率空间相机精密热控设计及验证[J]. *光子学报*, 2009, 38(9): 2363-2367.
- [3] Ding Yanwei, You Zheng, Lu E. Influences of temperature change on dimension stability of sensor opto-structural system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(10): 1170-1173. (in Chinese)

- 丁延卫, 尤政, 卢镔. 温度变化对相机光机结构尺寸稳定性的影响[J]. 光电子·激光, 2004, 15(10): 1170-1173.
- [4] Fan Jianzhong, Xiao Bolv, Xu Jun, et al. Development and applications of SiCp/Al composites in aerospace field [J]. *Materials Review*, 2007, 21(10): 98-101. (in Chinese)
- 樊建中, 肖伯律, 徐骏, 等. SiCp/Al 复合材料在航空航天领域的应用与发展[J]. 材料导报, 2007, 21(10): 98-101.
- [5] Yeh C L, Chen Y F, Wen C Y, et al. Measurement of thermal contact resistance of aluminum honeycombs [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27: 271-281.
- [6] Yang Jianzhong, Qi Yufeng, Lou Hanwen. Unlock connections and separating devices used in spacecraft [J]. *Spacecraft Engineering*, 2003, 12(1): 47-54. (in Chinese)
- 杨建中, 祁玉峰, 娄汉文. 航天器上使用的可解锁连接与分离装置[J]. 航天器工程, 2003, 12(1): 47-54.
- [7] Chen Guiming, Jia Jianyuan, Liu Xiaoyuan, et al. Study on the accuracy of flexure hinges [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 107-109. (in Chinese)
- 陈贵敏, 贾建援, 刘小院, 等. 柔性铰链精度特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 107-109.
- [8] Chen A W, Cao F, Hou W. The flexibility calculation of biaxial right circular flexible hinge [J]. *Journal of basic Science and Engineering*, 2010, 18(5): 838-846.
- [9] Smith S T. Flexures [M]. USA: CRC Press, 2000.
- [10] Lobontiu N. Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges [M]. USA: CRC Press, 2003.