文章编号　1004-924X(2011)12-2862-08

测绘相机在轨空间交会角变化的计算

韩　旭[1*]，马　军[2]，王忠素[2]，韩　冬[3]，黄　涛[4]

(1. 长春理工大学 光电工程学院，吉林 长春 130022；
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
3. 长春工业大学 机电工程学院，吉林 长春 100012；4. 中国科学院 高能物理所，北京 100049)

摘要：由于测绘相机在轨空间交会角在 5″内变化才能保证数据的可靠传输，本文研究了测绘相机交会角变化的计算方法。首先，利用 I-deas 软件计算了测绘相机在极端高温和低温两种工况下的温度场。然后，将计算得到的温度场作为温度载荷施加给结构模型，实现了由温度网格到结构网格的温度映射，即简单有限元模型到复杂有限元模型温度载荷的映射；计算了测绘相机的热弹性变形，得到了光学元件中心点变形量。最后，利用自编的软件计算了在两种极端温况下正视和后视相机的在轨交会角变化。结果表明，测试相机在高温和低温工况下空间交会角的变化在 5″范围内。该计算方法可得到空间相机交会角的变化量，计算数据可为测绘相机光机结构设计和热控方案的制定提供数据保障。

关　键　词：测绘相机；空间交会角；温度映射；热弹性变形

中图分类号：V243.5；TP73　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20111912.2862

Calculation of change of space intersection angle for mapping camera

HAN Xu[1*], MA Jun[2], WANG Zhong-su[2], HAN Dong[3], HUANG Tao[4]

(1. *College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130033, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
3. *School of Mechatronic, Changchun University of Technology, Changchun* 10012, *China*;
4. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: frequency126@126.com*

Abstract: This paper researches the calculation method for the change of space intersection angle of a mapping camera, for the change of the angle should be within 5″ to ensure the reliability of transmitting data in orbit. First, the temperature field was calculated for high and low temperature operating conditions with the I-deas software. Then, the calculated temperature field was input to a structural model as temperature load to complete the temperature mapping from a temperature model to the structural model, namely, from a simple model to a complex model. The thermal-elastic deformation

收稿日期：2011-04-19；**修订日期**：2011-06-21.
基金项目：国家重大工程项目

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

was calculated and the center of optical element deformation was obtained. Finally, the change of space intersection angle of the mapping camera was calculated in two operating conditions with a self-programming software. The results show that the change of intersection angle is below 5″ when the temperature operating condition is changed. It concludes that the calculated method can get the accurate change of intersection angle and the calculated data can benefit to the analysis on the space mapping.

Key words: mapping camera; space intersection angle; temperature mapping; thermal-elastic deformation

1　引　言

CCD 传输型相机是 80 年代发展起来用于航天摄影测量和遥感的重要传感器。它的成像原理与常规的航天立体测绘相机不同，拥有直接在轨成像的能力。三线阵 CCD 立体测绘相机由具有一定交会角的前视、正视和后视线阵 CCD 相机组成[1]。

由于相机入轨后将受到多种空间环境效应的作用，尤其是在轨温度的变化，将使光机结构发生热弹性变形，从而使测绘相机空间交会角发生变化。通过热光学成像试验可以得到它的变化量，但用地面环境模拟试验[2-8]来预示相机的在轨状态不仅成本高，而且有些状态在地面环境难以模拟。另外，地面环境试验只适用于成型的产品，在方案设计阶段不能实施，在设计上具有滞后性，而计算机仿真却可以通过屏幕样机的制作和建模，低成本完成空间相机的环境模拟。由于仿真技术计算周期短，对设计产品可以进行快速评价，因此，在空间相机的研制中发挥着重要的作用。目前，欧美已经仅通过计算机仿真的手段完成了某些热试验，由于不用进行地面热真空试验，大大节省了相机的研制经费。

虽然计算机仿真已完成了多项测绘相机的空间环境热试验，但关于测绘相机空间交会角计算方法的研究还未见报道，本文对在轨交会角计算方法进行了研究，采用在轨温度场温度映射结构网格的办法计算相机热弹性变形，从而计算出测绘相机在轨交会角的变化量在 5″范围内，满足设计指标，可以为地面合成图像[9-10]提供技术支持。

2　映射理论

进行光机热集成分析时，结构分析模型主要采用有限元方法来计算结构的热弹性变形，热分析模型主要采用节点网络法来计算结构的温度分布。空间相机的工作环境决定了其工作的热交换方式主要以热传导和热辐射为主，因此节点网络法计算的节点实际是热网络单元的几何中心。在进行热分析时，单元的离散化程度小，所以建立尺寸比较大的单元可以得到精度较高的结果，尤其是在计算辐射时，计算量非常大，如果设置的离散单元的尺寸小，计算量将成指数上升。采用有限元方法进行热弹性分析时，为了提高计算的精度，尤其对于空间相机来说，为了满足光学表面的变形精度，要求单元网格划分得较密。因此，如何把热分析的网络节点温度作为温度场载荷准确地施加到下一步热弹性计算的有限元网格上，是光机热集成分析的关键问题。

温度映射通过每个结构模型节点或单元的形心与最近的热模型单元建立关联来完成。

(1)如果结构节点在热模型内部，它的温度值将由热模型重心和 2 个最近的节点温度(壳单元)或重心和 3 个最近的节点温度(体单元)内差值得到。

(2)如果结构节点没有在与之关联的壳单元内部，它的温度值将通过投影到热模型壳单元平面后计算得到。然后利用重心和结构 2 个节点计

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

算得到线性温度场方程。

(3)如果结构节点不在与之关联的体单元内部,它的温度将由重心和3个最近的热模型节点的温度线性方程到它实际的位置外差值得到。

3 热模型

三线阵测绘相机由光机结构、光学系统、电子学系统、仿真计算机和测图软件等构成,涉及具有一定空间交会角(25°)的前视、正视、后视3台安装在测绘基座上的相机。测绘相机结构如图1所示。

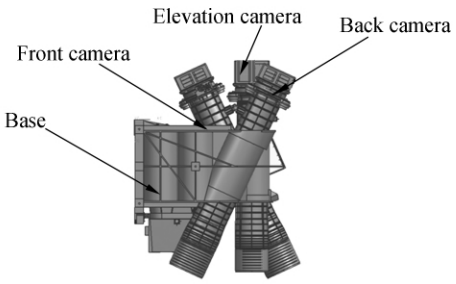


图1 三线阵测绘相机结构示意图

Fig. 1 Structural scheme of three-line mapping camera

测绘相机的热控指标要求温度水平在16.5~19.5 ℃,轴向温差≤2 ℃,径向温差≤0.3 ℃,空间交会角的变化小于5″。本文根据测绘相机的结构和轨道条件、热物理特性等参数,进行了角系数、辐射交换因子、空间外热流和网络系数热仿真计算,构建了热分析计算的仿真模型,其节点总数为2 664个,单元总数为2 485个,如图2所示,其中散热面取在3个电箱-Y面。

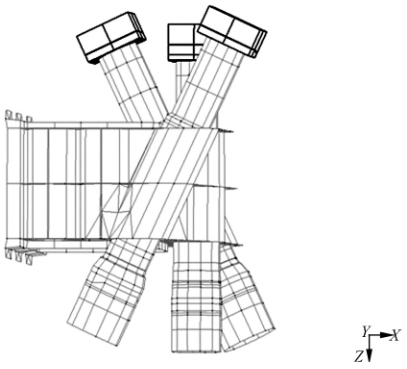


图2 三线阵测绘相机热模型

Fig. 2 Thermal model of three-line mapping camera

4 温度计算结果

分别定义测绘相机在轨低温和在轨高温2种极端工况如下:

(1)低温稳态工况

轨道降交点为1月23日,时间为13:30,太阳常数取1 322 W/m^2。考虑地球红外辐射,把地球等效为254 K的恒温黑体。

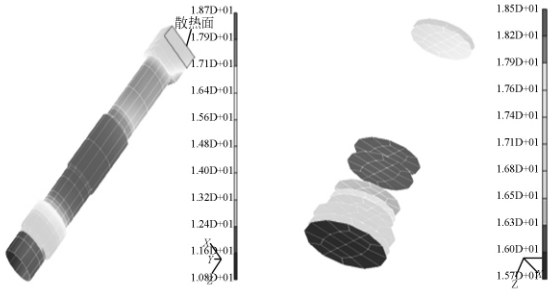
热控涂层的性能取卫星初期寿命的性能参数为:相机安装点温度为-8 ℃;相机不工作;主动热控工作。

(2)高温稳态工况

轨道降交点为5月15日,时间为13:30,太阳常数取1 412 W/m^2。考虑地球红外辐射,把地球等效为254 K的恒温黑体。

热控涂层的性能取卫星初期寿命的性能参数为:相机安装点温度为35 ℃;相机在轨均工作;主动热控工作。

以正视相机、后视相机和测绘基座为例,通过热分析计算,低温工况下测绘相机镜筒、电箱、物镜和测绘基座温度分布结果如图3~5所示;高温工况下它们的温度分布结果如图6~8所示。



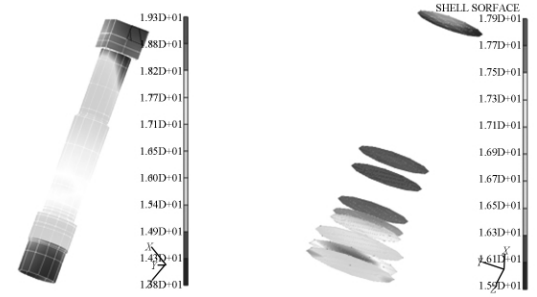
(a)整机外部 (b)光学元件

(a)Elevation camera (b)Optical elements

图3 正视相机低温稳态工况温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of elevation camera at low temperature

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

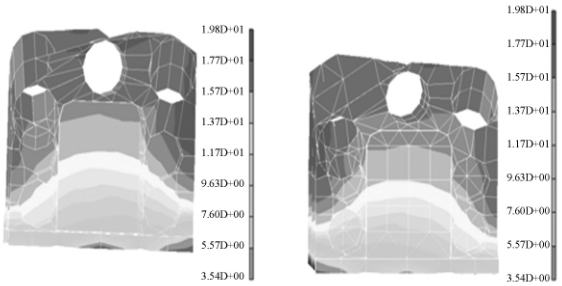


(a)整机外部　　(b)光学元件

(a) Back camera　　(b)Optical elements

图 4　后视相机低温稳态工况温度分布

Fig. 4　Temperature distribution of back camera at low temperature

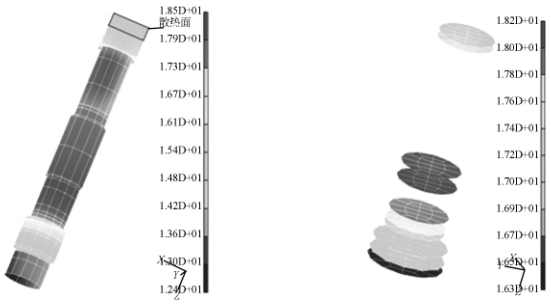


(a)+Z 向　　(b)−Z 向

(a)Z direction　　(b)−Z direction

图 5　测绘基座低温稳态工况温度分布

Fig. 5　Temperature distribution of base at low temperature

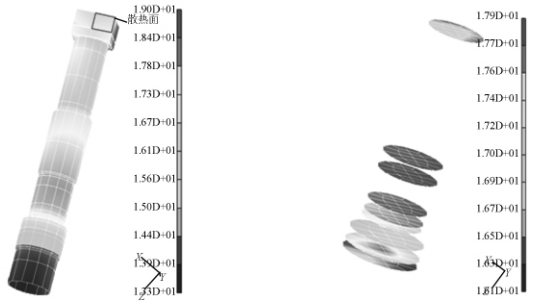


(a)整机外部　　(b)光学元件

(a) Elevation camera　　(b)Optical elements

图 6　正视相机高温稳态工况温度分布

Fig. 6　Temperature distribution of elevation camera at high temperature

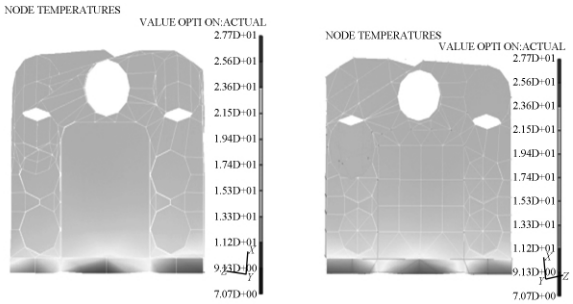


(a)整机外部　　(b)光学元件

(a) Back camera　　(b)Optical element

图 7　后视相机高温稳态工况温度分布

Fig. 7　Temperature distribution of back camera at high temperature



(a)+Z 向　　(b)−Z 向

(a)+Z direction　　(b)−Z direction

图 8　测绘基座高温稳态工况温度分布

Fig. 8　Temperature distribution of base at high temperature

从热分析计算结果来看，无论是低温稳态还是高温稳态工况，均可得出如下结论：

(1)成像光学元件的温度水平分布、径向温差及轴向温差都满足热控指标；

(2)相机整体温度按照中间高两端低的趋势分布，其分布规律正确；

(3)测绘基座温度分布合理，能够保证相机支撑变形要求。

5　温度映射

空间相机热弹性分析计算可以考察相机结构在热载荷下的位移变化情况，同时还可以得到光学元件的刚体位移及面形变化。

测绘相机的结构有限元模型如图 9 所示，它包括 68 039 个节点，65 978 个单元。其中，RTV 胶层参数按照一层单元材料各向同性建立[11]，光

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

学元件以六面体网格为主，镜筒以壳单元为主，光阑和镜筒上的筋以梁单元为主。

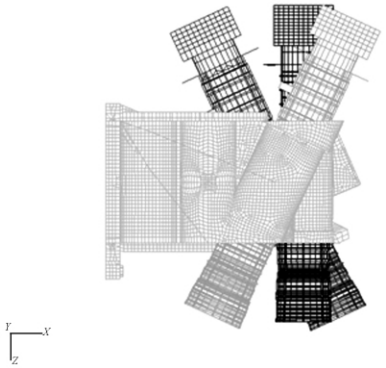
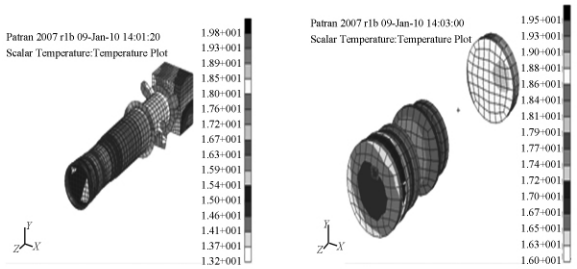


图 9 三线阵测绘相机有限元模型

Fig. 9 Finite element model of three-line mapping camera

以正视相机、后视相机和测绘基座为例，低温工况下测绘相机镜筒、电箱、物镜和测绘基座温度映射分布如图 10～12 所示；高温工况下它们的温度映射分布结果如图 13～15 所示。

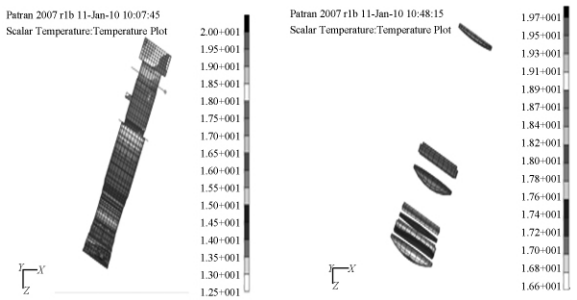


(a)整机外部 (b)光学元件

(a) Elevation camera (b)Optical elements

图 10 正视相机低温稳态工况温度映射分布

Fig. 10 Temperature mapping distribution of elevation camera at low temperature

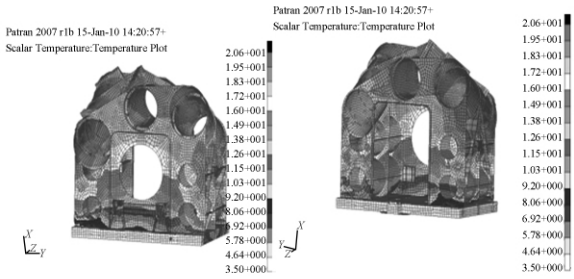


(a)整机外部 (b)光学元件

(a) Back camera (b)Optical elements

图 11 后视相机低温稳态工况温度映射分布

Fig. 11 Temperature mapping distribution of back camera at low temperature

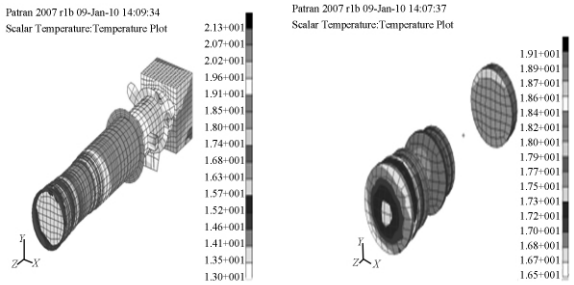


(a)+Z 向 (b)−Z 向

(a)+Z direction (b)−Z direction

图 12 测绘基座低温稳态工况温度映射分布

Fig. 12 Temperature mapping distribution of base at low temperature

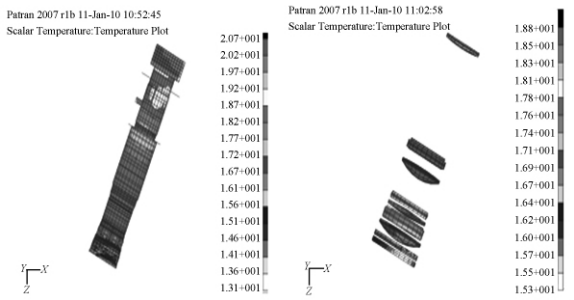


(a)整机外部 (b)光学元件

(a) Elevation camera (b)Optical elements

图 13 正视相机高温稳态工况温度映射分布

Fig. 13 Temperature mapping distribution of elevation camera at high temperature



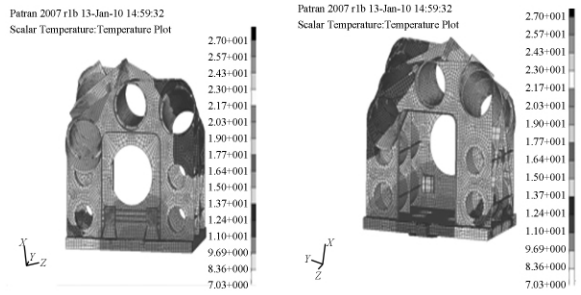
(a)整机外部 (b)光学元件

(a) Back camera (b)Optical elements

图 14 后视相机高温稳态工况温度映射分布

Fig. 14 Temperature mapping distribution of back camera at high temperature

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)＋Z 向　　(b)－Z 向

(a)＋Z direction　　(b)－Z direction

图 15　测绘基座高温稳态工况温度映射分布

Fig. 15　Temperature mapping distribution of base at high temperature

从映射结果可以看出，结构模型温度分布基本上能够和热模型的温度分布相对应，但是由于结构模型网格细小，且细节很多；而热模型网格粗大，且忽略很多细节，因此在映射过程中不可避免会出现畸变的温度分布，这就需要手工调整。

6　在轨交会角变化计算

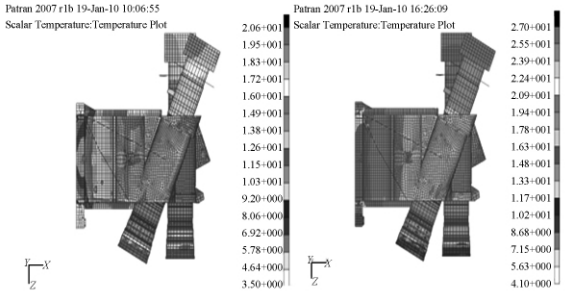
测绘相机交会角定义为 2 个相机光轴之间的夹角。对于 2 条直线来说，它们之间的空间夹角 θ 公式为

$$\tan\theta=(k_2-k_1)/(1+k_1\times k_2)\ ,$$

其中两条直线的斜率分别是 k_1 和 k_2。

测绘相机在轨交会角计算是通过温度映射方法把热分析的计算结果作为温度载荷加给结构网格，计算 2 台相机光轴的变化量的差值而得到的。图 16 为 2 台相机与测绘基座的温度载荷云图。

初始工况温度为 18°，将光学元件光轴上的所有节点（原始位置和变形后位置）作为计算点对低温和高温 2 种工况进行了计算，通过最小二乘法把变形后的节点位置进行一次拟合，得到变形后的斜率 k_2。图 17 为后视相机原始节点与变形后节点示意图。

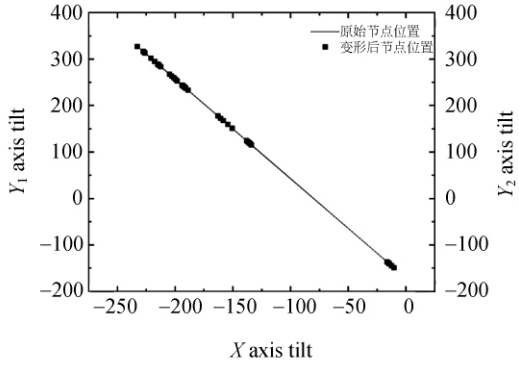


(a)低温工况　　(b)高温工况

(a)At low temperature　　(b)At high temperature

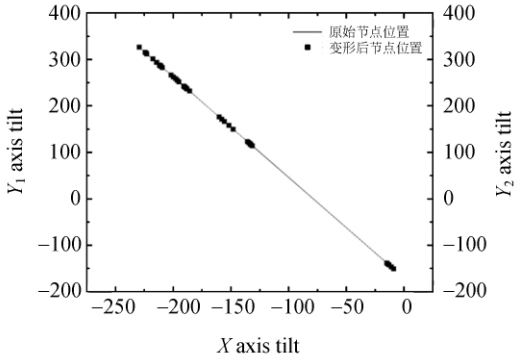
图 16　2 种工况温度载荷

Fig. 16　Temperature loads for two kinds of work conditions



(a)低温工况

(a)At low temperature



(b)高温工况

(b)At high temperature

图 17　后视相机节点位置示意图

Fig. 17　Node location for back camera

由 Matlab 编制的程序计算 2 个相机在低温和高温工况下的交会角及其变化量，计算结果如表 1 所示。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 两种工况夹角计算结果

Tab.1 Angles of two kinds of work conditions for back and elevation cameras

	低温工况	高温工况
变形前后视光轴与正视光轴夹角/(°)	25.003 4	25.003 4
变形后后视光轴与正视光轴夹角/(°)	25.003	25.003 2
变形后后视光轴直线拟合的均方根/(°)	0.259 66	0.259 7
变形后正视光轴直线拟合的均方根/(°)	0.000 494 69	0.000 467 42
变形后后视光轴与正视光轴夹角的变形量/(″)	1.44	0.72

从结果可以看出，通过在轨温度场映射计算的光轴变化量在2个工况下都小于设计值5″。

7 结 论

测绘相机空间交会角的稳定性影响地面影像合成准确性，在轨空间交会角计算可以为在轨分析和地面合成提供坚实的数据基础。本文对三线阵立体测绘相机在轨空间交会角的计算方法进行了研究，通过将在轨温度场映射结构网格方法计算了交会角的变化，得到测试相机在高温和低温工况下空间交会角的变化在5″的范围内，为测绘相机光机结构设计和热控方案的制定提供了数据保障。

参考文献：

[1] 吴国栋. 一种三线阵测绘相机CCD像面的装调方法[J]. 仪器仪表学报，2009，30(11)：2395-2398.
WU G D. Alignment method of CCD image plane for three-line array mapping camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(11): 2395-2398. (in Chinese)

[2] 韩旭，马军，局波，等. 三线阵测绘相机热光学试验交会角测试系统[J]. 光学 精密工程，2009，17(12)：2959-2964.
HAN X, MA J, JU B, *et al*.. Measuring system of space intersection angle for three-line mapping camera in thermal-optical test [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2959-2964. (in Chinese)

[3] 黎明，吴清文，江帆，等. 三线阵立体测绘相机热控系统的设计[J]. 光学 精密工程，2010，18(6)：1367-1373..
LI M, WU Q W, JIANG F, *et al*.. Design of thermal control system for three linear array mapping cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1367-1373. (in Chinese)

[4] 吴国栋，宋丹. 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，2007，15(11)：1727-1730.
WU G D, SONG D. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1727-1730. (in Chinese)

[5] 吴国栋，韩冰，何煦. 精密测角法的线阵CCD相机几何参数实验室标定方法[J]. 光学 精密工程，2007，15(10)：1628-1635.
WU G D, HAN B, HE X. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1628-1635. (in Chinese)

[6] 蒋山平，杨林华. 空间太阳望远镜热光学环境试验技术[J]. 航天器环境工程，2008，25(2)：173-176.
JIANG SH P, YANG L H. Review on thermal-optical test for space solar telescopes [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(2): 173-176. (in Chinese)

[7] 陶家生，王世涛. 大型航天三线阵立体测绘相机精度敏感因素的分析[J]. 光学技术，2006，32(1)：89-91.
TAO J SH, WANG SH T. Analysis on the large-scale space three-linear array camera precision sensitive factors [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(1): 89-91. (in Chinese)

[8] 杨居奎. 偏流对三线阵TDICCD测绘相机的影响分析[J]. 航天返回与遥感，2006，27(4)：27-32.
YANG J K. The effect of the drift on three-line TDICCD mapping camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(4): 27-32. (in Chinese)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[9] 胡燕，胡莘，王新义，等. 偏流角对星载三线阵相机摄影的影响[J]. 测绘科学，2006，31(4)：62-63.
HU Y, HU X, WANG X Y, *et al*.. The influence of drift angle on satellite photography of three-line array camera[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006，31(4)：62-63. (in Chinese)

[10] 王任亨，王新义，李晶，等. 提高卫星三线阵 CCD 影像空中三角测量精度及摄影测量覆盖效能[J]. 测绘科学，2003，28(3)：4-8.
WANG R H, WANG X Y, LI J, *et al*.. To improve the accuracy of aerial triangulation of satellite born three-line array CCD imagery and its photogrammetric cover efficiency [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2003, 28(3)：4-8. (in Chinese)

[11] 韩旭，吴清文，董德义，等. 室温硫化胶层建模在透镜结构分析中的应用[J]. 光学 精密工程，2010，18(1)：118-125.
HAN X, WU Q W, DONG D D, *et al*.. The correction of drift angle of the three-line array mapping satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010，18(1)：118-125. (in Chinese)

作者简介：

韩　旭(1974－)，男，吉林长春人，博士，助理研究员，1997 年于长春工业大学获得学士学位，2000 年于吉林大学获得硕士学位，2010 年于长春光学精密机械与物理研究所获博士学位，主要从事空间遥控器热光学的研究及家用电器振动和噪声故障诊断的研究。E-mail：frequency126@126.com

马　军(1960－)，男，吉林长春人，研究员，1983 年 7 月于长春理工大学(原长春光机学院)获得学士学位，主要从事光学检测及检测设备的研制。E-mail：mj-4856@163.com

王忠素(1977－)，女，黑龙江双城人，副研究员，2007 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位，主要从事结构分析和试验研究。E-mail：wzs1998@yahoo.com.cn

韩　冬(1974－)，女，吉林省吉林市人，讲师，博士，1995 年于吉林工学院获得学士学位，2006 年于吉林大学获得硕士学位，2009 年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事从事 CAD/CAE 技术及空间热控制技术的研究。E-mail：leaf_hd@163.com

黄　涛(1983－)，男，湖北宜昌人，助理工程师，2007 年于东北大学获得学士学位，2009 年于长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位，主要从事空间光学设备热控分析、加速器真空系统及相关控制系统设计的研究。E-mail：taohuang@ihep.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net