

文章编号 1004-924X(2022)02-0185-06

火星环绕器姿轨控制误差对高分相机像质的影响

姬琪¹, 王栋^{1*}, 闫得杰¹, 吴凡路^{1,2}, 王红园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 月球与深空探测重点实验室, 北京 100101)

摘要:火星环绕器绕火飞行,轨道是大椭圆轨道。高分相机是火星环绕器的有效载荷之一,在其轨道上对火拍摄,其成像质量除与自身参数相关外,还与姿轨控制误差有很大关系。为了实现对火星的高分辨率拍摄,本文对姿轨控制误差与相机成像质量的关系进行了研究。首先,分析了火星环绕器姿轨控制对高分相机像移的影响模型;然后,利用平行光管、动态目标模拟器搭建试验验证平台,通过地面测试设备仿真环绕器平台参数。设置动态目标模拟器产生速度随姿轨参数变化的动态目标,为相机提供拍摄目标。相机实时进行像移计算,并拍摄成像。试验结果表明,当测轨精度不大于1 km时,测速精度不大于1 m/s时,能保证相机动态MTF值下降不超过10%。采用高精度的姿轨控制可保证高分相机在轨成像质量的要求。

关键词:火星环绕器;高分相机;姿轨控制误差;成像质量

中图分类号:V476.4;V445.8 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223002.0185

Influence of attitude and orbit control error of Mars orbiter on image quality of high-resolution camera

Ji Qi¹, WANG Dong^{1*}, YAN Dejie¹, WU Fanlu^{1,2}, WANG Hongyuan¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

* Corresponding author, E-mail: wangd@ciomp.ac.cn

Abstract: The Mars orbiter orbits around Mars in a large elliptical orbit. Its high-resolution camera acts as one of the payloads of the Mars orbiter, and captures images of Mars from its orbit. The imaging quality of the camera is not only related to its own parameters, but also to the attitude and orbit control error. To realize high-resolution photography of Mars, the relationship between attitude and orbit control error and camera imaging quality is investigated in this study. First, the influence model of attitude and orbit control of the platform and image motion calculation of the high-resolution camera was analyzed. Then, the platform for the experiment and verification was built using a collimator and dynamic target simulator. The parameters of the orbit and satellite platform were simulated using ground simulation software, and the pa-

收稿日期:2020-09-25;修订日期:2020-11-20.

基金项目:中国科学院月球与深空探测重点实验室开放基金资助项目(No. LDSE201901);国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42001345, No. 61805001)

rameters were injected into the dynamic target simulator and high-resolution camera. The dynamic target simulator can generate the dynamic target, which is used as the shooting target by the camera, and the velocity of the target varies with the attitude and orbit parameters. The camera performs image motion calculation on real-time and imaged according to the image motion compensation parameters. The experimental results indicate that the dynamic MTF of the camera can be reduced by less than 10% when the orbit accuracy is less than 1 km and velocity accuracy is less than 1 m/s. High-precision attitude and orbit control can guarantee the imaging quality of the high-resolution camera.

Key words: Mars orbiter; high-resolution camera; attitude and orbit control error; imaging quality

1 引言

随着我国航天事业的蓬勃兴起,对宇宙的探索也逐渐从近地观测向深空探测发展。火星探测任务是我国深空探测的重要环节,天问一号火星探测器发射升空,其任务就是通过一次发射,实现对火星环绕、在火着陆和巡视探测。天问一号的环绕器上携带了高分辨率相机(简称“高分相机”),绕火星环绕探测,获取火星表面重点区域精细观测图像,开展火星表面地形地貌和地质构造等方面的研究^[1-3]。

高分相机为 TDI CCD 相机,在高空对火面进行推扫拍摄。相机在轨工作期间,当拍摄物与相机感光面存在相对运动时,就会产生像移,导致成像模糊;只有当 CCD 电荷转移速率与拍摄物在像面的运动速率相匹配,才能清晰成像。为了获得高清图像,需根据相机实际的轨道参数,实时进行像移补偿。像移补偿技术是实现高分辨率拍摄的重要环节^[4-6]。

高分相机绕火运行,轨道是大椭圆轨道,环绕器在轨飞行速度和轨道高度是不断变化的,这会引起 TDI CCD 相机行转移时间,数据读出频率、偏流角和像移速度大小也随之变化。针对像移补偿,国内外已经进行了广泛研究,并建立了很多像移模型及补偿策略,极大地提升了相机成像质量^[7-14]。

火星距离地球约在 5 600 万至 4 亿公里之间,火星探测需要在远离地球的环境中进行超远距离姿轨控制,其测轨精度及测速精度对照地球都有一定差距。为保证高分相机像移补偿准确,获取高清图像,必须对姿轨控制提出相应的要求。

本文对环绕器姿轨控制与像移的关系进行了分析,并开展了相关试验进行验证。

2 姿轨控制与像移的关系

高分相机随着环绕器轨道的高度不同,实时进行像移补偿计算。对于近圆轨道,轨道高度变化范围较小,相应的像移速度变化范围也较小,近似于匀速圆周运动;而对于椭圆轨道,像移速度会随着轨道高度的变化而变化。

火星环绕器、火星与椭圆轨道示意图如图 1 所示。火星位于椭圆焦点 F_2 处,环绕器距火星地心距为 r ,在轨运行速度为 V 。

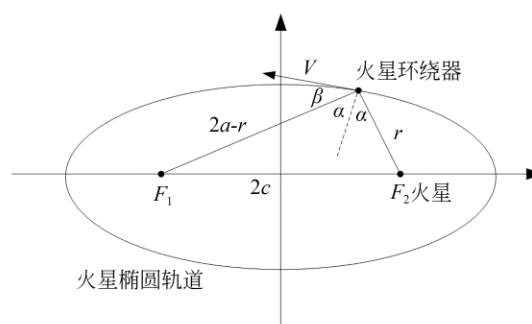


图 1 火星轨道示意图

Fig. 1 Diagram of Mars orbit

根据几何关系可以得到:

$$r^2 + (2a - r)^2 - 2r(2a - r)\cos 2\alpha = (2c)^2, \quad (1)$$

$$\cos 2\alpha = 2\cos^2 \alpha - 1, \quad (2)$$

$$a^2 = b^2 + c^2, \quad (3)$$

其中: a 、 b 、 c 分别为椭圆轨道的半长轴、半短轴、半焦距。

计算得到:

$$\cos \alpha = \frac{b}{\sqrt{r(2a-r)}}. \quad (4)$$

火星环绕器的速度方向与瞬时圆轨道坐标X轴方向的夹角为:

$$\delta = 2\alpha + \beta - 90^\circ = \alpha. \quad (5)$$

火星环绕器瞬时圆轨道速度为:

$$v = V \sin \alpha. \quad (6)$$

火星环绕器坐标系映射到高分相机坐标系时速度存在比例关系,见图2所示。相机焦距为 f' ,轨道高度为 H 。

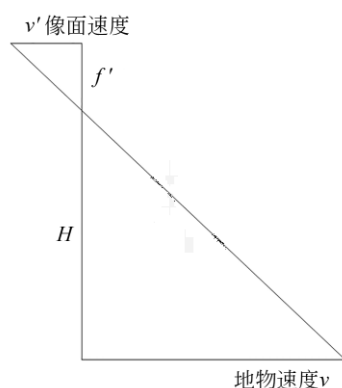


图2 物像关系

Fig. 2 Relationship between objects and images

由物像关系可得高分相机像面速度为

$$v' = v \frac{f'}{H} = V \sin \alpha \frac{f'}{H}. \quad (7)$$

由此可见高分相机像移速度和环绕器速度及轨道高度相关。因此,姿轨控制精度必然影响高分相机的成像质量。

3 试验验证

3.1 测试链路及原理

为验证姿轨控制误差对相机成像质量的影响,本文进行了相机成像试验验证。图3是试验测试链路。

试验设备包括平行光管、动态目标模拟器及地面测试设备。为减少气流扰动的影响,可将相机放在真空罐内以减少环境对成像质量的影响。

动态目标模拟器的目标转台上刻有黑白相

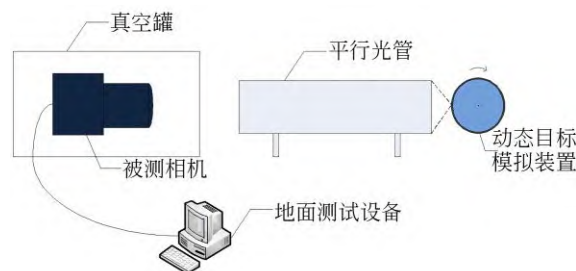


图3 测试链路

Fig. 3 Test link diagram

间的条纹,通过旋转产生动态目标,模拟地面物体的运动。试验时将动态目标模拟器安置在平行光管的焦面处,通过目标转台旋转产生动态目标,并经平行光管投射到被测相机。

动态目标模拟器光路图如图4所示。

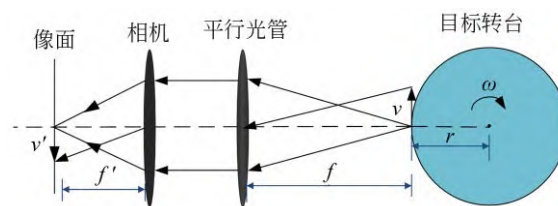


图4 试验光路示意图

Fig. 4 Light path diagram

设动态目标模拟器目标转台的转动角速度 ω ,通过计算可得到像面的像移速度 v' 。

$$v' = \frac{\omega r}{f} f', \quad (8)$$

其中: v' 为像面的像移速度, ω 为动态目标模拟器目标转台的角速度, r 为动态目标模拟器目标转台的旋转半径, f 为平行光管焦距, f' 为相机焦距。调节动态目标模拟器的工作角速度 ω ,可以模拟不同轨道动态目标。

环绕器当前飞行高度、姿态等轨道信息参数可以由地面测试设备仿真生成,并由1553B总线进行广播。被测相机实时接收地面测试设备广播的平台姿轨参数,开始像移计算,得到TDI CCD拍摄的行频参数,通过成像电路控制拍摄时电荷转移时间,实现像移补偿功能。地面测试设备采集高分相机图像,并对图像进行MTF计算,评价此次成像质量。

3.2 试验过程及结果

假设高分相机工作在 340 km 轨道高度,在此条件下,高分相机进行像移计算,可得到相机拍摄行频参数 a ,由像元尺寸 b 可以反推得到动态目标发生器与其匹配的转速,见公式(9)。

$$\omega = \frac{abf}{f'r}. \tag{9}$$

动态目标模拟器实物图见图 5。

按 340 km 轨道条件设置动态目标模拟器的转速,高分相机在此条件下拍摄成像,采集图像计算当前轨道的 MTF 值,以此作为基



图5 动态目标模拟器
Fig. 5 Dynamic target simulator

准值。

随后保持动态目标模拟器转速不变,地面测试设备将广播姿轨参数中轨道误差及速度误差逐渐增加,高分相机在有误差的条件下进行像移计算并拍摄,对采集的图像进行 MTF 计算,MTF 测试结果图见图 6,结果见表 1。

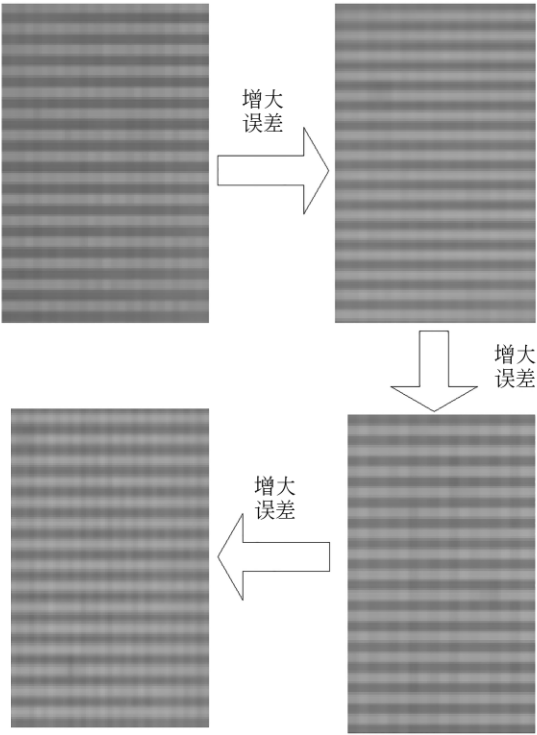


图6 MTF 测试图
Fig. 6 MTF test pictures

表 1 MTF 测试结果

Tab. 1 Test result of MTF

测量次数	试验条件	动态目标模拟器转速/ $((^{\circ})\cdot s^{-1})$	相机行频计算值/Hz	MTF 测试值
1	轨道高度及速度均适配	80	5 975. 245	0. 140
2	测轨精度 1 km; 测速精度 1 km/s;	80	5 952. 381	0. 127
3	测轨精度 2 km; 测速精度 2 km/s;	80	5 927. 180	0. 122
4	测轨精度 3 km; 测速精度 3 km/s;	80	5 907. 173	0. 113

试验结果可以看出,随着姿轨控制误差的逐渐增大,MTF 结果逐渐变小。由表 1 可以得到误差与 MTF 的关系,如图 7 所示。当测轨精度为 1 km,测速精度为 1 km/s 时,MTF 下降约 9%,图

像目视尚可接受。当测轨精度为 2 km,测速精度为 2 km/s 时,MTF 下降约 13%,图像像质逐渐变差。当测轨精度为 3 km,测速精度为 3 km/s 时,MTF 下降约 19%,图像明显模糊。

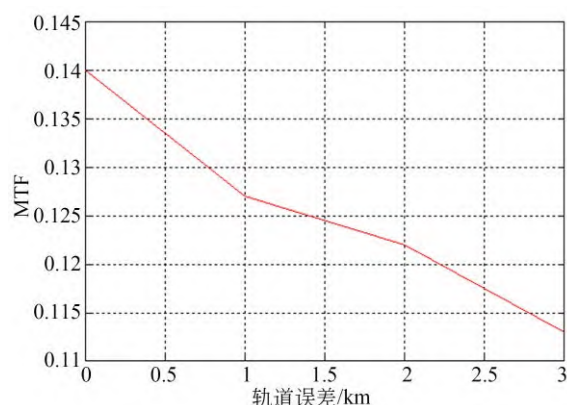


图7 误差结果

Fig. 7 Error results

参考文献:

- [1] 李春来,刘建军,耿言,等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 406-413.
LI C L, LIU J J, GENG Y, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 406-413. (in Chinese)
- [2] 朱岩,白云飞,王连国,等. 中国首次火星探测工程有效载荷总体设计[J]. 深空探测学报, 2017, 4(6): 510-514, 534.
ZHU Y, BAI Y F, WANG L G, *et al.* Integral technical scheme of payloads system for Chinese Mars-1 exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 510-514, 534. (in Chinese)
- [3] 孟庆宇,付中梁,董吉洪,等. 火星探测高分辨率可见光相机光学系统设计[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 458-464.
MENG Q Y, FU Z L, DONG J H, *et al.* The optical system design of the high-resolution visible spectral camera for China Mars exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 458-464. (in Chinese)
- [4] 孙雪晨,吕恒毅,薛旭成,等. 高分辨力遥感相机CCD采样位置自适应补偿技术[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 973-978.
SUN X C, LÜ H Y, XUE X C, *et al.* Adaptive compensation technique for CCD signal sampling positions in high-resolution remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 973-978.

因此为保证成像质量,以MTF下降不能超过10%为约束,测轨精度应保证在1 km,测速精度应保证在1 km/s范围内。

4 结 论

本文对火星环绕器高分相机在轨成像质量与姿轨控制误差之间的关系进行了分析,提出了试验验证方法,最后,给出了不同姿轨控制误差下的MTF测试结果。实验结果证明:随着测轨精度下降,成像质量相应下降。当测轨精度在1 km,测速精度在1 km/s范围内时,可保证高分相机成像质量,满足在轨使用要求。

(in Chinese)

- [5] 李永昌,金龙旭,李国宁,等. 宽视场遥感相机像移速度模型及补偿策略[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(8): 1278-1286.
LI Y C, JIN L X, LI G N, *et al.* Image motion velocity model and compensation strategy of wide-field remote sensing camera[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1278-1286. (in Chinese)
- [6] 徐力智,颜昌翔,李颐,等. 航空摆扫成像像移计算与误差分配[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2071-2079.
XU L Z, YAN C X, LI Y, *et al.* Image motion calculation and error distribution for aerial whisk-broom imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(10): 2071-2079. (in Chinese)
- [7] REN H, HU T T. Driving circuitry of a full-frame area array charge-coupled device (CCD) supporting multiple output modes and electronic image motion compensation [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2020, 48(5): 481-504.
- [8] 路朋罗,李永昌,金龙旭,等. 大视场空间相机的像移速度场模型及卫星三轴姿态稳定度分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2173-2182.
LU P L, LI Y C, JIN L X, *et al.* Image motion velocity field model of space camera with large field and analysis on three-axis attitude stability of satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2173-2182. (in Chinese)
- [9] 武星星,刘金国. 基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2):

- 351-359.
- WU X X, LIU J G. Image motion compensation of scroll imaging for space camera based on earth ellipsoid[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 351-359. (in Chinese)
- [10] 王正玺, 张葆, 李贤涛, 等. 快速反射镜在像移补偿中的应用[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 95-105.
- WANG Z X, ZHANG B, LI X T, *et al.* Application of fast steering mirror in image motion compensation[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 95-105. (in Chinese)
- [11] 武星星, 刘金国, 周怀得. 应用地球椭球的大视场空间相机像移补偿[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 280-286.
- WU X X, LIU J G, ZHOU H D. Image motion compensation of space camera with large field of view using earth ellipsoid[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 280-286. (in Chinese)
- [12] 朱俊青, 沙巍, 陈长征, 等. 大口径空间相机像质的微振动频率响应计算[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1118-1127.
- ZHU J Q, SHA W, CHEN C Z, *et al.* Frequency response of imaging quality by micro-vibration for large-aperture space-borne telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1118-1127. (in Chinese)
- [13] 吕恒毅, 薛旭成, 赵运隆, 等. 空间光学相机在乃奎斯特频率处的调制传递函数测试与实验[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1484-1489.
- LÜ H Y, XUE X C, ZHAO Y L, *et al.* Measurement and experiment of modulation transfer function at Nyquist frequency for space optical cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1484-1489. (in Chinese)
- [14] 王密, 朱映, 范城城. 高分辨率光学卫星影像平台震颤几何精度影响分析与处理研究综述[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 1899-1908.
- WANG M, ZHU Y, FAN C C. Development of platform jitter geometric analysis and processing for high-resolution optical satellite imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1899-1908. (in Chinese)

作者简介:



姬 琪(1978—),男,山西太原人,硕士,副研究员,硕士生导师,2002年于天津大学获得学士学位,2007年于中国科学院研究生院获得硕士学位,主要从事空间遥感器测试与仿真技术等方面的研究。E-mail: jiqi@ciomp. ac. cn



王 栋(1979—),男,山西阳泉人,博士,研究员,硕士生导师,2002年于长春理工大学获得学士学位,2007年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事空间光学遥感器总体设计、空间电子学总体设计、数字图像处理等方面的研究。E-mail: wangd@ciomp. ac. cncn