

文章编号 1004-924X(2022)02-0153-07

基于火星大椭圆轨道像移补偿计算方法

闫得杰^{1,2*}, 孙兴国³, 刘海秋⁴, 吴凡路^{1,2}, 关海南¹, 王 栋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;

3. 一汽-大众汽车有限公司, 吉林 长春 130011;

4. 安徽农业大学, 安徽 合肥 230036)

摘要:为了实现天问一号高分辨率相机在大椭圆轨道下对火星表面高质量成像,建立了基于火星的大椭圆轨道像移计算模型。对大椭圆轨道和像移计算方法进行研究。首先,根据大椭圆轨道的特点,分析大椭圆轨道与近圆轨道存在的差别。接着,依据椭圆特性和角动量守恒原理计算高分辨率相机到火星中心的距离、椭圆运动轨道速度、轨道速度与离心速度的夹角。然后,根据齐次坐标变换的方法将火星景点坐标系与高分辨率相机坐标系建立联系,通过对位置关系的求导得出像移速度。最后,通过动态成像试验验证了像移补偿计算方法的正确性和对图像质量的影响。实验结果表明:大椭圆轨道像移补偿计算方法正确;动态传函大于0.1,满足动态传函不小于0.1的指标要求;像移匹配(Modulation transfer function, MTF)最小值为0.953,满足不低于0.95的指标要求。

关键词:像移补偿;大椭圆;高分辨率;火星;齐次坐标

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223002.0153

Image motion compensation method based on large elliptical orbit

YAN Dejie^{1,2*}, SUN Xingguo³, LIU Haiqiu⁴, WU Fanlu^{1,2}, GUAN Hainan¹, WANG Dong¹

(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;

3. FAW-Volkswagen Automotive Co. Ltd, Changchun 130011, China;

4. Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

* Corresponding author, E-mail: yandj2008@163.com

Abstract: In order to realize high-quality imaging of the Mars surface by the Tianwen-1 high-resolution camera in large elliptical orbit, a large elliptical orbit image motion calculation model based on Mars is established. The calculation method of the large elliptical orbit and image motion is studied. First, according to the characteristics of the large elliptical orbit, the difference between the large elliptical orbit and a near circular orbit is analyzed. Then, the distance from the high-resolution camera to the center of Mars, the or-

收稿日期:2020-09-18;修订日期:2020-11-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61805001);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)

bital velocity of elliptical motion, and the angle between orbital velocity and centrifugal velocity are calculated according to the characteristics of the ellipse and the conservation principle of angular momentum. Then, according to the method of homogeneous coordinate transformation, the Mars scenic spot coordinate system is connected with the high-resolution camera coordinate system, and the image motion velocity is obtained by deriving the position relationship. Finally, the correctness of the image motion compensation calculation method and its influence on image quality are verified through a dynamic imaging experiment. The experimental results show that: the calculation method of image motion compensation for large elliptical orbit is correct; the dynamic transfer function is greater than 0.1, and the dynamic transfer function is not less than 0.1; and the minimum value of image motion matching MTF (Modulation transfer function) is 0.953, which meets the requirement of no less than 0.95.

Key words: image motion compensation; large elliptical orbit; high resolution; Mars; homogeneous coordinates

1 引言

天问一号作为我国首次火星探测任务,是我国行星探测迈出的第一步,也是中国人迈向更远深空的关键一步。天问一号火星环绕器核心任务之一就是以大椭圆轨道环绕火星运行,高分辨率相机搭载在火星环绕器上,主要对火星的表面进行高分辨率的多光谱探测成像,获得火星地形地貌的影像,观测火星表面地质现象的形成和变化过程^[1-3]。对于近圆轨道来说,像移速度计算方法已经很成熟,在应用上已经很普遍。但是高分相机大椭圆轨道的计算和应用在国内外相关文献中很难检索到。因此相对于常规的近圆轨道,火星探测器大椭圆运行轨道将给高分辨率相机探测任务带来挑战。挑战在于将大椭圆轨道的变化合理的加入到近圆轨道的像移补偿模型中,使飞行器在任何轨道任何姿态时,都能准确的计算出相机像面上任何位置的像移速度。

火星高分辨率相机采用长焦距、小像元设计,使用TDI CCD探测器件,通过对同一目标多级数曝光来提高图像信噪比,因此对像移补偿精度要求远高于低分辨率的相机,像移补偿模型需要充分考虑各种因素的影响^[4-6]。目前现有的像移补偿模型是基于近圆轨道建立的,对于大椭圆轨道不完全适用。大椭圆轨道的像移速度矢变化规律与近圆轨道存在很大的差别,首先,离心

速度(飞行器在轨道面内指向天顶方向的速度分量)的加入使像移变化情况更加复杂,像移速度的变化量也更快,必须实时计算像移速度^[7],完成实时像移匹配,将像移速度累积误差控制在允许范围内,才能保证清晰成像^[8-10]。其次,在非星下点成像时,离心速度会叠加到像面上沿 CCD 积分方向和垂直 CCD 积分方向的两个像移速度分量上,使得模型的建立更加繁琐。因此像移补偿计算方法是影响火星高分辨率相机任务成败的关键环节^[11-12]。

本文根据大椭圆轨道的特点,将轨道速度分解为环火速度和离心速度,建立了大椭圆轨道像移补偿计算模型,获得了高分辨率相机像移补偿计算方法。

2 大椭圆轨道参数计算

卫星在近圆轨道上运行时,万有引力全部用来提供向心力,这时卫星的加速度就是向心加速度;而在椭圆轨道上运行时,万有引力没有全部用来提供向心力,向心加速度将不再等于轨道上运动的加速度。椭圆轨道示意图如图 1 所示。

V 为轨道速度,与轨道相切; BG 为焦面上 TDI CCD 的积分方向且垂直于 BF_1 ,根据轨道速度和轨道速度与离心速度的夹角可以确定环火速度 V_{C1} 、离心速度 V_{C3} 。

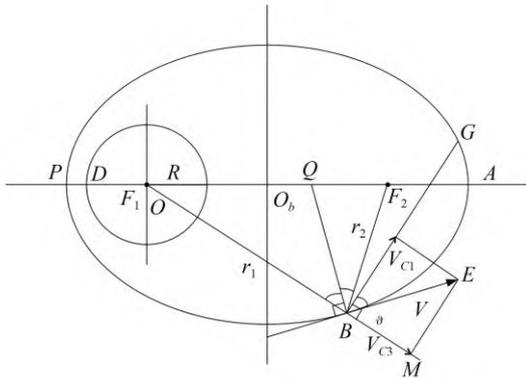


图 1 椭圆轨道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of elliptical orbit

2.1 轨道速度计算公式

根据椭球运动的活力公式可得轨道速度:

$$V = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}, \quad (1)$$

其中: G 为万有引力常数, 取 $6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$; M 为火星质量, 取 $6.4219 \times 10^{23} \text{ kg}$; r 为火星中心点到环绕器的距离, 即 BF_1 ; a 为椭圆轨道半长轴。

依据椭圆第二定义环绕器到火星中心的距离:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f}, \quad (2)$$

其中: a 为椭圆轨道半长轴, e 为椭圆轨道的偏心率, f 为真近点角。

2.2 轨道速度与离心速度的夹角计算

轨道速度和离心速度夹角几何关系如图 1 所示。

B 为在椭圆轨道上环绕器的位置, F_1, F_2 为椭圆轨道的两个焦点; r_1, r_2 为椭圆轨道的焦点半径, $BF_1 = r_1, BF_2 = r_2$ 。

在三角形 F_1BF_2 中, 根据余弦定理:

$$\cos \angle F_1BF_2 = \frac{r_1^2 + r_2^2 - (F_1F_2)^2}{2r_1r_2}. \quad (3)$$

在任意三角形 F_1BF_2 中, 过点 B 做轨道速度 V 的垂线 BQ , 根据椭圆性质, BQ 平分角 $\angle F_1BF_2$, $\angle F_1BQ = \angle QBF_2$ 由此可得:

$$\cos \angle F_1BQ = \frac{\sqrt{a^2(1 - e^2)}}{r_1r_2}, \quad (4)$$

r_1 为环绕器到火星中心的距离, 即为 H_0 , $r_2 = 2a - r_1 = 2a - H_0$, 由此可得:

$$\cos \angle F_1BQ = \frac{\sqrt{a^2(1 - e^2)}}{H_0(2a - H_0)}. \quad (5)$$

由于 ϑ 和 $\angle F_1BQ$ 互为余角, 因此可得 ϑ 值。

3 模型建立

焦平面上的任一点 p 在像面坐标系中的坐标为 $(p_1, p_2, 0, 1)$, 在 t_0 时刻, 寻找其在过景点坐标系中的对应的景点 $g(g_1, g_2, 0, 1)$;

高分相机对火星表面观测时, 焦平面上的任意一像点 p , 在 t_0 时刻时必然能找到其对应的景点 g 。在相机坐标系中 p 点在像面的矢量表达 \boldsymbol{p} 为 $(p_1, p_2, f, 1)^T$, 在相机坐标系中, 作从相机坐标系的原点 C_0 出发到像点 p 视线的单位矢量 \boldsymbol{r} :

$$\boldsymbol{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1/l \\ p_2/l \\ f'/l \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, $l = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + f'^2}$ 。

景点 g 在轨道坐标系 B 中的矢量表达 \boldsymbol{b}_g 为:

$$\boldsymbol{b}_g = \begin{bmatrix} b_{g1} \\ b_{g2} \\ b_{g3} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_1L \\ -r_2L \\ L \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, L 为探测器到景点的距离。

景点 g 在景点坐标系 G 中的矢量表达为 \boldsymbol{g} :

$$\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r'_1L \\ r'_1L \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

在 $t_1 = t_0 + t$ 时刻, 寻找对应景点 g 的焦平面上的像点 p' , 在相机坐标系坐标为 $c(c_1, c_2, c_3, 1)$ 。

对像面上任意像点 p 在 t_0 时刻的对应的地面景点 g 进行了定位, 经过一段时间 t 后到达 t_1 时刻, 景点 g 在像面上对应像点位置发了变化, 为 p' , 从 p 到 p' 的矢量 $\Delta \boldsymbol{p}$ 即在 t 时间段内景点 g 在像面上的像移量, $\Delta \boldsymbol{p}$ 对 t 在 $t=0$ 时求导, 即得到像点 p 像移速度矢。 p' 位置的确定是整个模型重点, 在整个 t 时间段内, 各参数都有一定的变化, 使得模型建立特别复杂, 因此通过从景点坐标系

到相机坐标系变化,在不同坐标系中,加入对应参数的变化值,求得 g 点在 t_1 时刻时在相机坐标系中的位置,根据成像系统的坐标变换进而求得

p' 在相机坐标系中的表示。 g 从景点坐标系 G 到相机坐标系 C 的坐标变换示意图如图 2 所示。坐标转换矩阵见式(9)。

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi + \dot{\psi}t) & \sin(\psi + \dot{\psi}t) & 0 & 0 \\ -\sin(\psi + \dot{\psi}t) & \cos(\psi + \dot{\psi}t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta + \dot{\theta}t) & 0 & -\sin(\theta + \dot{\theta}t) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta + \dot{\theta}t) & 0 & \cos(\theta + \dot{\theta}t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi + \dot{\varphi}t) & \sin(\varphi + \dot{\varphi}t) & 0 \\ 0 & -\sin(\varphi + \dot{\varphi}t) & \cos(\varphi + \dot{\varphi}t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -H_0 - V_{C3}t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos[\gamma_0 + V_{C1}t/(H_0 + V_{C3}t)] & 0 & \sin[\gamma_0 + V_{C1}t/(H_0 + V_{C3}t)] & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin[\gamma_0 + V_{C1}t/(H_0 + V_{C3}t)] & 0 & \cos[\gamma_0 + V_{C1}t/(H_0 + V_{C3}t)] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega t & 0 & \sin \omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega t & 0 & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & 0 & \sin \gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_0 & 0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

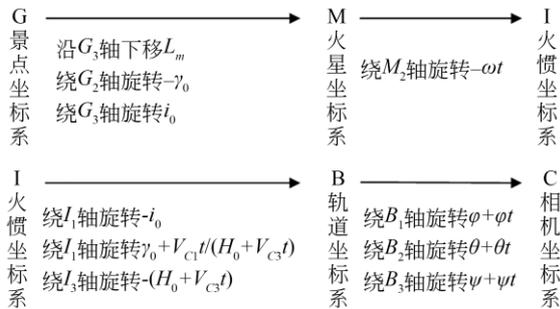


图 2 坐标转换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate transformation

表 1 像移速度随轨道高度变化

Tab. 1 Image motion velocity changing with track height

序号	轨道高度 /km	轨道速度 /($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	像移速度 /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	265	4.344	71.2
2	500	4.178	33.5
3	800	3.985	18.1
4	1 100	3.811	11.5
5	1 400	3.651	8.00
6	1 700	3.504	5.85
7	2 000	3.368	4.46

4 实验与结果

大椭圆轨道不同于以往的近圆轨道,在高分相机成像过程中轨道高度实时变化,像移速度随轨道高度变化见表 1。由此可以看出,大椭圆轨道导致像移速度的变化量很大,采用实时像移补偿计算必不可少。

高分相机在真空环境下,将平行光管和动态目标发生器置于气浮平台上,通过六足平台调整相机位置,使动态目标发生器的像可以成到像面上。动态目标发生器模拟景物运动,进行动态成

像实验,实验环境示意图如图 3 所示。实验使用靶标黑白条纹线宽 $37.7 \mu\text{m}$,相机像面上黑白条纹线宽为 $8.75 \mu\text{m}$,对应线对数为 57.14 lp/mm 。以参考文献[13]中对于 96 级 TDI CCD 像移补偿残差为 $1/3$ 个像元时像移匹配 MTF 为 0.95 为像移补偿计算的指标要求。

不同积分级数下通过适配的像移速度进行匹配时的拍摄图如图 4 所示。动态 MTF 基本保

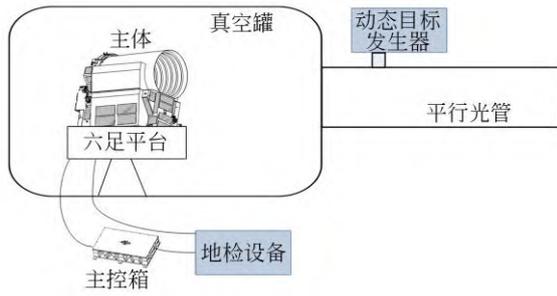


图 3 动态成像实验环境示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic imaging experiment environment

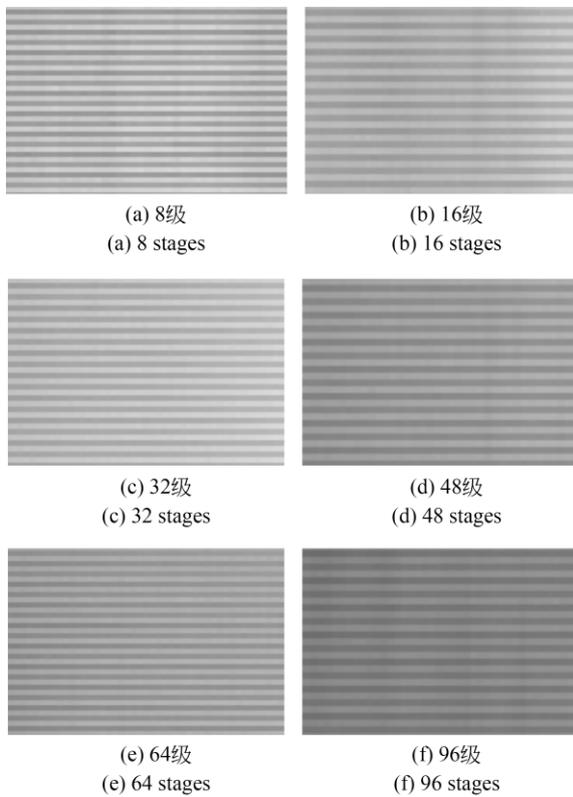


图 4 不同 TDI CCD 积分级数下动态成像(适配像移)
Fig. 4 Dynamic image of different TDI CCD integration progression (matched image motion)

持一致,见表 2,均达到 0.1 以上,满足相机动态传函不小于 0.1 的指标要求。

不同积分级数下通过实时计算像移速度进行速度匹配时的拍摄图如图 5 所示。动态 MTF 基本保持一致,见表 2,均达到 0.1 以上,满足相机动态传函不小于 0.1 的指标要求。

通过表 2 可以看出,实时计算像移速度像移匹配 MTF 最小值为 0.953,满足不低于 0.95 的要求。

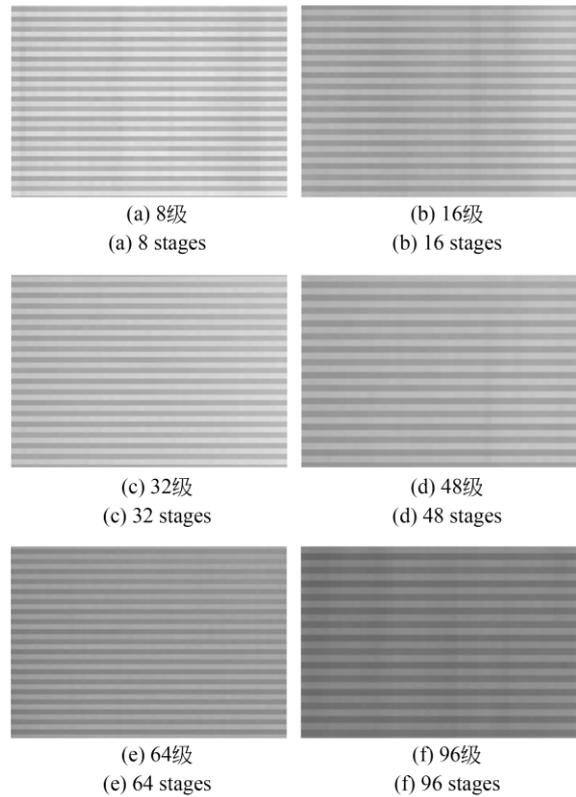


图 5 不同 TDICCD 积分级数下动态成像(计算像移)
Fig. 5 Dynamic image of different TDICCD integration progression (calculating image motion)

表 2 动态 MTF 测试值

Tab. 2 Dynamic MTF test value

序号	积分级数	动态 MTF (适配像移)	动态 MTF (计算像移)	像移匹配 MTF
1	8	0.112	0.110	0.982
2	16	0.107	0.102	0.953
3	32	0.105	0.101	0.962
4	48	0.104	0.102	0.981
5	64	0.109	0.108	0.991
6	96	0.108	0.104	0.963

5 结 论

本文对满足天问一号高分辨率相机成像质量要求的大椭圆轨道像移补偿算法进行了设计。根据大椭圆轨道的特点,对轨道速度进行分解得到了环火速度和离心速度,推导了高分辨率相机到火星中心的距离、椭圆运动轨道速度、轨道速度与离心速度的夹角。采用齐次坐标变换将火星表面景物点和高分相机焦面上的像点之间的

位置关系建立了像移补偿计算模型,在模型中增加了环火速度和离心速度,保证在大椭圆轨道下像移速度值的准确性。实验结果证明:火星高分辨率相机在大椭圆轨道下像移速度变化范围大,因此在高分相机成像过程中实时计算像移并通过调整 TDI CCD 行转移速度是必不可少的。

参考文献:

- [1] 武星星,刘全国.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)
- [2] 王运,颜昌翔.基于差分法的空间相机像移速度矢量计算[J].光学精密工程,2011,19(5):1054-1060.
WANG Y, YAN C X. Computation of image motion velocity vector for space camera based on difference method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1054-1060. (in Chinese)
- [3] 朱军,李永昌,白照广,等.低轨高分辨率遥感卫星姿态机动对月定标方法[J].光学精密工程,2020,28(9):1913-1923.
ZHU J, LI Y C, BAI Z G, *et al.* Lunar calibration method through attitude maneuver of low-earth-orbit and high-resolution remote sensing satellites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1913-1923. (in Chinese)
- [4] 李晓云,杜伟.星载TDICCD相机像移对成像质量的影响分析[J].航天器工程,2011,20(3):51-55.
LI X Y, DU W. Analysis of image motion effect on satellite TDICCD camera image quality [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(3): 51-55. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 王国良,刘全国,龙科慧,等.离轴三反航天测绘相机像移对成像质量的影响[J].光学精密工程,2014,22(3):806-813.
WANG G L, LIU J G, LONG K H, *et al.* Influence of image motion on image quality of off-axis TMA aerospace mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 806-813. (in Chinese)
- [7] 赵嘉鑫,张涛,杨永明,等.TDI-CCD全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J].光学学报,2014,34(7):0728003.
ZHAO J X, ZHANG T, YANG Y M, *et al.* Image motion velocity field of TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728003. (in Chinese)
- [8] 巫兆聪,杨帆,巫远,等.高程对TDICCD相机像移补偿影响分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2015,40(12):1570-1574,1587.
WU Z C, YANG F, WU Y, *et al.* The influence of elevation on the TDICCD camera's image motion compensation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(12): 1570-1574, 1587. (in Chinese)
- [9] 任秉文,金光,张元,等.畸变对TDI成像相机的像移影响研究[J].红外与激光工程,2014,43(12):3951-3957.
REN B W, JIN G, ZHANG Y, *et al.* Influence of image motion on TDI imaging camera by distortion effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3951-3957. (in Chinese)
- [10] 徐力智,颜昌翔,李颀,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 whiskbroom imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(10): 2071-2079. (in Chinese)
- [11] 闫得杰,徐抒岩,韩诚山.飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J].光学精密工程,2008,16(11):2199-2203.
YAN D J, XU S Y, HAN C S. Effect of aircraft

- attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2199-2203. (in Chinese)
- [12] 赵庆磊. 空间相机主控系统的控制策略研究[D]. 北京:中国科学院大学,2016.
ZHAO Q L. *The Control Strategy Research of Main Control System on Space Camera* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [13] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所研究生部教材,1998.
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Nechanics and Physics, 1998. (in Chinese)

作者简介:



闫得杰(1979—),女,吉林德惠人,硕士,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2010年于中国科学院研究生院获得硕士学位,主要从事飞行器像移补偿、星载嵌入式软件设计等方面的研究。E-mail: yandj2008@163.com



孙兴国(1976—),男,吉林舒兰人,硕士,高级工程师,2000年于华东交通大学获得学士学位,2004年于吉林大学获得硕士学位,主要从事无人驾驶、图像识别等方面的研究。E-mail: xingguo.sun@faw-vw.com