

星载红外探测器快速反射镜控制系统设计

吕世良^{1,2}, 刘金国¹, 周怀得¹, 梅 贵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. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 像移补偿是保证星载红外探测器成像质量的关键技术之一, 针对某星载红外探测器光学系统的设计特点和成像工作模式, 为补偿红外探测器在轨运行方向产生的像移和摆扫方向产生的像移, 提出分别对俯仰方向快速反射镜和方位方向快速反射镜实施控制的方案。首先介绍红外遥感原理及像移现象; 其次详细分析红外探测器光学系统的设计特点和光学系统组成; 然后重点分析了红外探测器在轨工作中的像移产生的原因, 并计算出在轨运行方向产生的像移量和摆扫方向产生的像移量; 最后提出像移补偿方案, 阐明其工作原理, 并对像移控制系统硬件设计进行了详细分析。计算结果表明所设计的像移补偿系统的运动范围和运动加速度满足红外探测器技术指标的要求。

关键词: 中波红外探测器; 音圈电机; 像移补偿; 快速反射镜

中图分类号: TP394.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0904005

Design of control system for fast steering mirror of infrared detector based on satellite

Lv Shiliang^{1,2}, Liu Jinguo¹, Zhou Huaide¹, Mei Gui¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China)

Abstract: Imaging motion compensation is one of the key technologies to improve the imaging quality in infrared detector based on the satellite. The control system of the fast steering mirrors was proposed to compensate the imaging motion respectively in the pitching direction and azimuth direction, considering the optical system and the working mode for the infrared detector based on the satellite. Firstly, the principle of infrared remote sensing and imaging motion were introduced. Secondly, the design features and components of optical system of the infrared detector were analyzed in detail. Thirdly, the causes of imaging motion in the infrared detector on orbit was analyzed, and the imaging motion value both in the pitching direction and azimuth direction was calculated according to the optical system and imaging working mode. Finally, the scheme of image motion compensation was proposed and the hardware system was designed in detail. The calculated result shows that the range of movement and acceleration of the image motion compensation can meet the precision requirements for infrared detector.

Key words: middle infrared detector; voice coil motor; image motion compensation; fast steering mirror

收稿日期: 2017-01-06; 修订日期: 2017-02-05

基金项目: 地理信息工程国家重点实验室开放研究基金(SKLGIE2014-Z-3-1)

作者简介: 吕世良(1974-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间相机伺服控制、传感器成像和图像处理等方面的研究。

Email: lvsl@ciomp.ac.cn

0 引言

以卫星为天基平台获取地球表面目标信息是现代遥感领域的重要手段之一,随着遥感应应用技术的发展,当前可见光谱段空间遥感探测器向宽视场、宽覆盖、高分辨率方向发展^[1]。可见光谱段遥感探测是目前应用最为广泛和成熟的空间遥感技术,其工作原理是探测器的光学系统接收来自于目标物体对可见光谱段光的反射或者物体自身发出的可见光谱段的光,因此可见光谱段探测只能在昼间进行,且受气象条件的影响很大^[2]。

而以目标自身红外辐射能量作为目标信号源的被动红外探测技术,其工作原理是红外探测器的光学系统接收目标物体自身向外辐射的红外谱段的能量,通过对红外辐射能量的感知来探测目标^[3-5]。根据红外辐射学理论,自然界物体自身都有发射一定谱段的红外线的特性,且这种红外辐射是物体固有的属性,不随环境气候变化而变化^[6-8],因此红外探测器系统与可见光探测器系统相比,克服了可见光探测系统对时间和环境气候的依赖,可以全天候及在部分不良的气象条件下成像,获取被观测目标的物理属性信息^[3]。红外探测技术对于军事和民用都具有重要的意义^[4-5]。其在军事领域中的多种类型导弹的导引头、巡航导弹寻的器等武器中有着广泛的应用;在空间探测及民用遥感领域中也应用广泛,如在国土资源调查与监测、农林水资源和地质勘查、生态环境监测、防灾减灾调查以及城市规划等方面^[9-12]。

但是基于卫星平台的红外探测器成像时,由于地球自转、卫星平台运动、摆动等原因,探测器感光介质在曝光时刻,目标物经光学系统的像与探测器焦平面感光像元间存在相对运动,而导致探测系统的传递函数下降、成像模糊即像移现象。像移导致探测器系统成像质量下降,甚至可能完全淹没目标无法成像^[7]。

为了确保探测器在轨工作时的成像质量,消除像移对探测器成像质量的影响,需要设计像移补偿系统对像移量进行补偿。文中研究的某红外探测器系统,为补偿像移设计两套独立的快速反射镜补偿机构,分别补偿俯仰方向和方位方向的像移,而实现像移补偿功能的关键是控制快速反射镜,因此针

对像移补偿技术要求详细设计了快速反射镜的控制系统。

1 红外探测器光学系统设计

通过分析地面目标及海上目标的红外特性,确定采取中波红外谱段作为影像摄取谱段,对目标进行被动无源探测,具有不易受干扰优点。对红外探测器光学系统技术指标要求如表 1 所示。

表 1 光学系统技术指标

Tab.1 Optical system technical index

Parameters	Values
Wavelength/ μm	3-5
GSD(ground sample distance)/m	15
$F\#$	4
Focus length/mm	896
Pixel size/ μm^2	24×24
Pixel number of detector	640×512
Orbital altitude/km	560

根据红外探测器的光学技术指标,设计红外探测器的光路原理如图 1 所示。

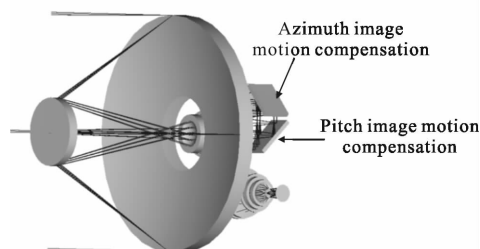


图 1 中波红外探测器光路原理图

Fig.1 Diagram of middle infrared detector light path

红外探测器的光学系统采用前置无焦系统形成中间平行光路加成像光学系统的结构形式,如图 2 所示。这种光学系统使探测器的摆扫部分仅为前置无焦系统部分,避免了整机摆扫的问题,平行光路增加前向像移补偿反射镜和摆扫像移补偿反射镜,分别对卫星在轨运行产生的俯仰像移和摆扫产生的方位像移进行补偿。探测器采用连续摆扫成像工作模式以提高探测器的工作效率,扩大地面覆盖宽度。

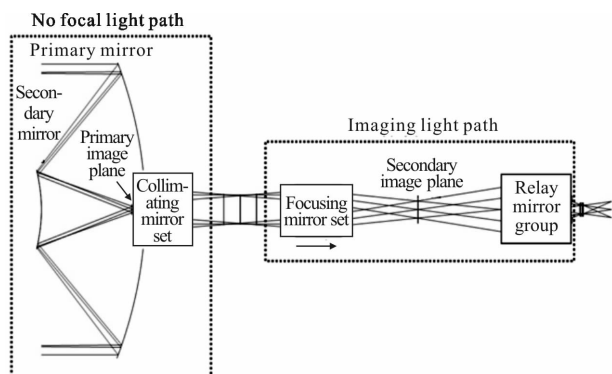


图 2 光学系统结构图

Fig.2 Structure diagram of optical system

选用大像元的红外 CCD 探测器以提高探测能力,为满足分辨率的要求,探测器的光学系统必须是长焦距大口径光学系统。而光学系统设计需要考虑探测器两轴框架机构、反射镜支撑结构、调焦机构、二维稳像机构、探测器以及电路板等部分的安装集成对探测器内部空间的需求,因此光学系统需要实现高度紧凑、轻小型、光机集成一体化设计。对比透射式、同轴折反射式、离轴反射式系统,同轴折反射式系统更易满足舱体内空间布局的要求,因此采用多次成像的同轴折反射结构形式系统。

如图 2 所示,红外探测器光学系统结构包括反射镜组、准直镜组、随动反射镜、像移补偿反射镜、二次成像镜组和中继镜组。反射镜组与准直镜组形成无焦光路并具有实出瞳;随动反射镜随主系统摆扫,两块像移补偿反射镜置于实出瞳附近通过转动实现前向俯仰像移和摆扫方向的方位像移补偿;二次成像镜组用于二次成像并作为调焦组件;中继镜组实现光阑匹配、焦距的缩放。为了达到结构紧凑的目的,将像移补偿反射镜、二次成像镜组和中继镜组安装于主镜背板上,通过光路折叠保证系统较为紧凑。

2 像移分析

中波红外探测器依据目标在探测器上成像所占像元个数进行目标类型的判别。受卫星平台飞行、卫星平台姿态变化及中段红外探测器框架波动的影响,在曝光过程中目标经中段红外探测器的光学系统所成像会相对探测器进行运动,进而产生像移^[9]。像移一方面会影响目标细节的分辨能力,另一方面会使目标所占探测器像元个数增多,导致对目标类

型的误判。经分析卫星飞行引起的最大前向像移约 3.75 个像元,俯仰方向角速率引起的像移约为 52 个像元,方位方向角速率引起的像移约为 26 个像元,因此需要补偿俯仰和方位两个方向的像移。根据光机系统设计,当反射镜运动性能指标满足角度行程 $\pm 1^\circ$ 、最大角加速度不小于 $1\ 000\ \text{rad/s}^2$ 、反射镜阶跃响应时间小于 80 ms 时,反射镜定位精度为 $12\ \mu\text{rad}$ 即可补偿两个方向的像移量。

3 像移补偿系统组成

探测器工作时目标相对于光学系统的视场位置不断变化,导致传递函数下降、成像模糊。二维稳像机构就是用于抵消这种变化,实现对目标的凝视。凝视过程中成像光路的视场中心与无焦光路的视场中心不再重合,彼此之间存在相对运动^[10]。为了保证在运动过程中能够清晰成像,光学系统必须满足两个条件:

- (1) 探测器各部分对应的物方视场应该具有同样的变化;
- (2) 在稳像过程中各视场的光学传递函数几乎不变。

根据红外探测器的总体技术要求,采用在准直光路中加入两块小口径能够高精度、快速运动的平面反射镜补偿像移,确保红外探测器实现清晰成像^[1-4,13]。快速反射镜在光学系统中的位置如图 1 所示。快速反射镜结构如图 3 所示,包括:音圈电机、平面反射镜、反射镜支座、像移补偿组件支座、轴承、轴承保护盖、电机支撑板、高精度位移传感器等。

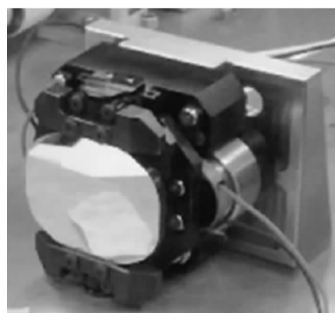


图 3 快速反射镜结构图

Fig.3 Diagram of the fast steering mirror structure

由于红外探测器总体结构尺寸有限,它要求快速反射镜组件必须具有轻巧的结构。为此反射镜机构的两块平面反射镜的材料均选择铝合金材料,反

射镜与反射镜支座之间通过螺钉的方式直接相连，在反射镜的联结位置设计具有圆切口的柔性铰链，以减小安装过程中的装配应力对镜面面型精度的影响。安装完反射镜后，反射镜的面型精度优于 $\lambda/30$ ($\lambda=4.2 \mu\text{m}$)。快速反射镜运动部分质量 $M=0.04 \text{ kg}$ ，反射镜绕轴旋转半径 $R=30 \text{ mm}$ 。

4 像移补偿控制系统设计

像移补偿控制系统工作原理如图 4 所示。像移补偿系统有位置工作方式和补偿工作方式，由像移

补偿周期信号进行两种工作方式的切换。当工作在位置方式时，系统反射镜被锁定在初始位置；当工作在补偿方式时，补偿系统接收框架陀螺给出的框架速度，对于俯仰方向像移补偿系统补偿的速度包含探测器控制器发送的前向像移速度，将补偿速度的积分结果输入到补偿控制器，补偿控制器校正环节的校正结果输出给功率级驱动电机。为了提高反射镜的补偿精度与快速性，像移补偿组件的执行元件选用音圈电机(VCA)，以减小摩擦力矩扰动对反射镜运动性能的影响^[5-8]。

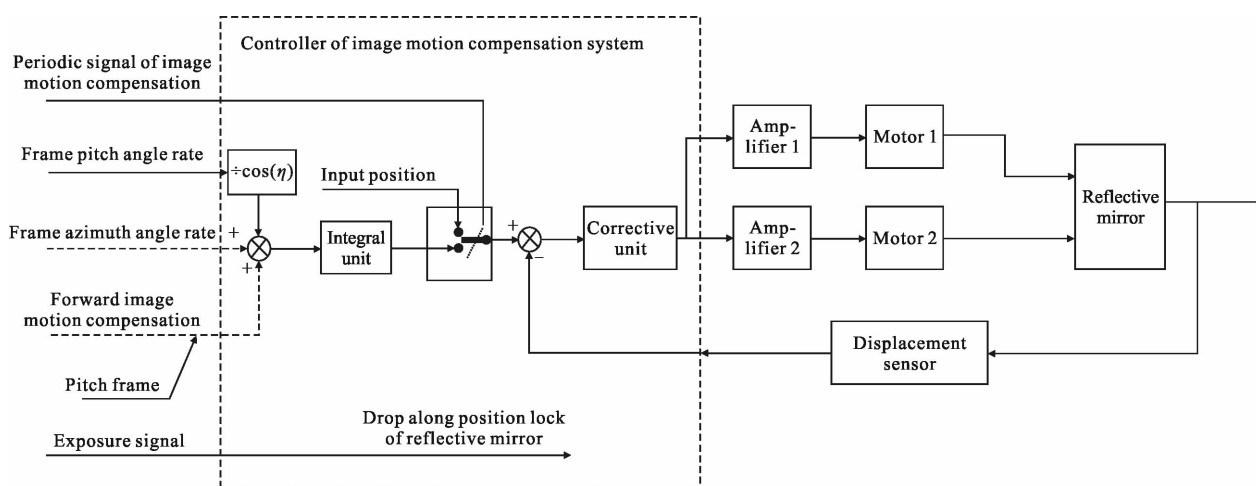


图 4 像移补偿系统快速反射镜控制方框图

Fig.4 Block diagram of control system of the fast steering mirror of image motion compensation system

每一个补偿系统使用两个音圈电机，通过推拉方式带动反射镜沿着中心轴转动。补偿过程中在曝光信号下降沿将补偿镜的角度信息锁存。根据反射镜最大角加速度不小于 $\alpha=1\ 000 \text{ rad/s}^2$ 的要求，需要的最大推力：

$$F=M\alpha R=0.04\times 1\ 000\times 0.03=1.2 \text{ N} \quad (1)$$

选用 TMEC0003-003-00A 音圈电机，基本参数：电阻 $R_{\Omega}=3 \Omega$ ，电感 $L=0.24 \text{ mH}$ ，其力常数 $K_f=1.8 \text{ N/A}$ ，峰值推力 $F_p=3 \text{ N}$ ，连续转推力 $F_c=1.3 \text{ N}$ ，总行程 $S=3 \text{ mm}$ ，线圈质量 $m=7 \text{ g}$ ，音圈电机总质量 41 g 。电气时间常数为：

$$T_e=\frac{L}{R_{\Omega}}=\frac{0.24}{3}=0.08 \text{ ms} \quad (2)$$

音圈电机的机械时间常数为：

$$T_m=\frac{MR_{\Omega}}{k^2f}=\frac{(0.04+2\times 0.007)\times 3}{1.8\times 1.8}=50.01 \text{ ms} \quad (3)$$

如图 3 所示，两个音圈电机连续推力对反射镜

推拉产生的连续角加速度 α_{continue} 为：

$$\alpha_{\text{continue}}=\frac{2F_c}{(M+2m)R}=\frac{2\times 1.3}{(0.04+2\times 0.007)\times 0.03}=1\ 604.9 \text{ rad/s}^2 \quad (4)$$

两个音圈电机峰值推力对反射镜推拉产生的峰值角加速度 α_{max} 为：

$$\alpha_{\text{max}}=\frac{2F_p}{(M+2m)R}=\frac{2\times 3}{(0.04+2\times 0.007)\times 0.03}=3\ 703.7 \text{ rad/s}^2 \quad (5)$$

α_{continue} 、 α_{max} 均大于反射镜的最大角加速度 $\alpha=1\ 000 \text{ rad/s}^2$ 的要求。

当反射镜运动 1° 时，计算反射镜边缘运动圆弧长度：

$$l=\frac{\pi R}{180}=\frac{3.14\times 0.03}{180}=0.52 \text{ mm} \quad (6)$$

因此选择精度为 $0.1 \mu\text{m}$ ，量程为 $\pm 2 \mu\text{m}$ 的高精

度电涡流传感器实现非接触式的高精度位移测量。

以 DSP28335 为核心控制器,设计了像移补偿控制系统如图 5 所示。因为 DSP28335 片内 AD 是 12 位

采用位数,不能满足像移补偿对位移测量精度的要求,因此选用 14 位的 AD7865 作为高精度位移测量的模数转换器。

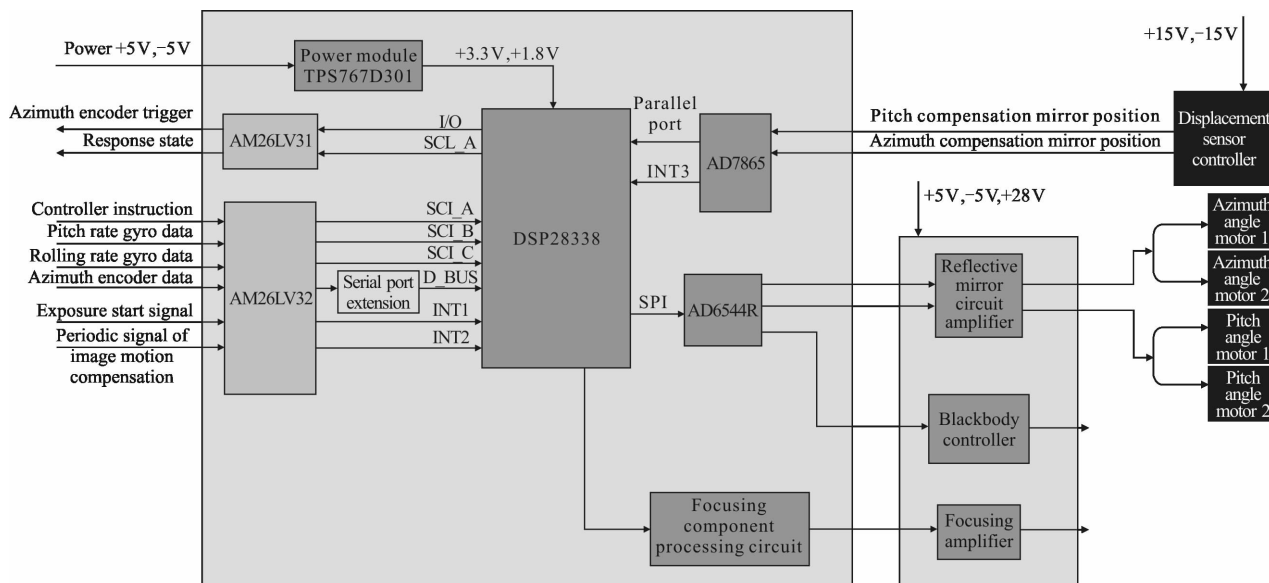


图 5 像移补偿系统硬件组成图

Fig.5 Hardware composition diagram of image moving compensation system

5 结论

针对某星载红外探测器光学系统的设计特点和成像工作模式,对影响成像质量的像移产生原因进行了详细的分析,并计算出俯仰方向的像移量和方位方向的像移量,按照像移对探测器传递函数的影响可接受的程度,结合成像模式推导出快速反射镜实现像移补偿的运动性能指标:即反射镜运动角度行程 $\pm 1^\circ$ 、最大角加速度不小于 $1\ 000\ \text{rad/s}^2$ 、反射镜阶跃响应时间小于 $80\ \text{ms}$ 。据此确定反射镜控制系统所需的音圈电机参数,并详细计算音圈电机在连续力矩和峰值力矩工作时,对快速反射镜产生的角加速度均大于最大角加速度不小于 $1\ 000\ \text{rad/s}^2$ 的指标要求。根据反射镜的运动角度行程,计算并确定精度为 $0.1\ \mu\text{m}$,量程为 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 的高精度电涡流传感器对反射镜非接触式的高精度位移测量。

计算结果表明所设计的像移补偿系统的运动范围和运动加速度满足红外探测器技术指标的要求,表明快速反射镜控制方案设计合理。

参考文献:

- [1] Wang Yanbin. Research on mid-wave infrared zoom system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
王艳彬. 中波红外变焦光学系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [2] Mei Gui, Zhai Yan, Miao Jianyu, et al. Design of a high resolution and wide field space infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222004. (in Chinese)
梅贵, 翟岩, 苗建宇, 等. 空间高分辨率宽视场红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222004.
- [3] Lv Shiliang, Liu Jinguo, Jia Ping, et al. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(8): 2154–2160. (in Chinese)
吕世良, 刘金国, 贾平, 等. 离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2154–2160.
- [4] Wang Hongyuan, Chen Yun. Modeling and simulation of infrared dynamic characteristics of space-based space targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0504002. (in Chinese)

- 汪洪源, 陈赞. 天基空间目标红外动态辐射特性建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0504002.
- [5] Bai Yuzhuo, Mu Rui, Ma Lin, et al. Design of infrared optical system with super-long focal length and dual field-of-view[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 631–637. (in Chinese)
白玉琢, 木锐, 马琳, 等. 超长焦距红外双视场光学系统设计[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 631–637.
- [6] Yu Linyao, Wei Qun, Zhang Tianyi, et al. Design of long focal infrared catadioptric optical system for multi-guided system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 234–240. (in Chinese)
虞林瑶, 魏群, 张天翼, 等. 中波红外长焦距折反光学系统设计[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 234–240.
- [7] Yang Yongming, Li Xinyang, Kuang Haipeng, et al. Image motion analysis and compensation for aerial scanning camera during turning flight [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 635–642. (in Chinese)
杨永明, 李昕阳, 匡海鹏, 等. 航空摆扫相机转弯成像像移分析及补偿[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 635–642.
- [8] Light D L. Characteristics of remote sensors for mapping and earth science applications [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1990, 56(12): 1613–1623.
- [9] Li Yongchang, Jin Longxu, Wu Yinan, et al. Image motion velocity field of off-axis TMA space camera with large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0513001. (in Chinese)
李永昌, 金龙旭, 武奕楠, 等. 离轴三反大视场空间相机像移速度场模型[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0513001.
- [10] Hu Bin, Huang Ying, Ma Yongli, et al. Design of five-mirror afocal principal system for high spatial resolution infrared imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0518001. (in Chinese)
胡斌, 黄颖, 马永利, 等. 高分辨率红外成像仪五反无焦主系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0518001.
- [11] Lv Shiliang, Liu Jinguo. Analysis of focusing accuracy for multispectral CCD camera based on satellite[C]//SPIE, 2015, 9677: 96772S–5.
- [12] Lv Shiliang, Liu Jinguo. Design of refocusing system for a high resolution space TDICCD camera with wide-field of view [C]//SPIE, 2015, 9677: 96772R–1.
- [13] Wang Heqi, Wang Weiguo, Xu Xinhang, et al. Solution of correcting values on laser beam directing of fast steering mirror for mobile vehicle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1399–1406. (in Chinese)
王鹤淇, 王伟国, 徐新行, 等. 机动车载快速反射镜激光指向修正量的解算 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1399–1406.