

月基极紫外相机指向机构控制系统

于 涛

(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: 为了保证月基极紫外相机能够准确地对地指向, 实现对地球周围等离子体层产生的 30.4 nm 辐射进行全方位、长期的观测研究, 设计并研制了指向机构控制系统。首先介绍了指向机构控制系统的构成及工作原理; 其次对系统的关键模块进行详细设计; 然后提出了一种基于霍尔传感器定位的控制算法; 最后对系统的误差源进行详细分析。误差计算和月球表面工作的结果表明: 基于霍尔传感器定位的控制算法正确、有效, 指向机构控制系统对地指向的控制误差 $\leq 0.1^\circ$, 满足极紫外相机技术指标要求。

关键词: 极紫外相机; 对地指向控制; 霍尔传感器; 指向机构

中图分类号: V443.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0318002

Control system of pointing mechanism for lunar based extreme ultraviolet camera

Yu Tao

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

Abstract: In order to ensure that the extreme ultraviolet camera can point the earth exactly, monitor and research 30.4 nm radiation generated by the earth plasmasphere roundly and chronically, the control system of pointing mechanism was designed and developed. Firstly, the structure and the operating principle of control system were introduced. Secondly, the key modules of control system were designed in detail. Then, a control algorithm based on Hall sensor positioning was presented. Finally, the error sources of control system were analyzed in detail. The results of calculated errors and the work on lunar indicate that the control algorithm based on Hall sensor positioning is correct and effective, the control error of pointing mechanism is no larger than 0.1° and satisfies the requirement of extreme ultraviolet camera technical indexes.

Key words: extreme ultraviolet camera; pointing earth control; Hall sensor; pointing mechanism

收稿日期: 2017-10-19; 修订日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(61108066)

作者简介: 于涛(1980-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 硕士, 主要从事空间光学遥感器嵌入式系统方面的研究。

Email: yut@ciomp.ac.cn

0 引言

地球等离子体层是围绕在 2~7 个 RE(RE 约为 6 378.5 km, 表示地球半径)范围内的圆环状致密等离子体区域, 其演化过程将影响地球内部磁层结构和近地空间环境, 地球等离子体层中粒子的显著特征之一是共振散射太阳光中的极紫外辐射, 其散射强度与散射点离子密度成正比。因此, 研究等离子体层离子分布的最好方法是通过光学方法对辐射进行成像, 再通过图像反演得到等离子体层的离子密度分布, 从而观测和研究磁暴和亚暴期间等离子体层对地磁活动的响应, 实现地月空间的天气监测预报^[1-3]。

探月工程嫦娥三号将实现月球软着陆探测, 着陆器承载多种科学载荷。其中, 极紫外相机将执行嫦娥三号科学目标探测的一个重要任务, 对地球周围等离子体层产生的 30.4 nm 辐射进行全方位、长期的观测研究, 获得地球等离子层三维图像。极紫外相机是月球表面着陆的极紫外波段的成像仪, 观测结果有助于了解太阳和地球的相互关系, 对于地球天气和空间天气研究具有非常重要的意义^[4-6]。

为了对地球等离子体层的整个轮廓成像和监测等离子体层的空间分布及其变化, 极紫外相机需要保持准确的对地指向, 需要将极紫外相机安装在二维指向机构上, 以补偿着陆器的倾斜及地、月轨道间的角度变化。因此, 对指向机构的正确控制, 是保障极紫外相机能否准确对地获取科学数据的关键。考虑到月球表面的环境恶劣, 嫦娥三号飞往月球表面过程中对重量的严格限制, 极紫外相机在月球表面工作过程中对功耗的严格限制, 在选择指向机构定位元件时, 由于霍尔传感器具有体积小、重量轻、功耗低、可靠性高、定位准确等优点, 并且已经在航空航天领域得到广泛应用, 因此极紫外相机采用霍尔传感器作为指向机构位置的定位元件。文中详细介绍了月基极紫外相机指向机构控制系统的工作原理、设计以及基于霍尔传感器定位的指向机构控制方法, 经过误差分析和月球表面工作验证, 指向机构控制系统满足极紫外相机的技术指标要求。

1 主要技术指标及约束

根据极紫外相机的任务要求, 指向系统应满足

表 1 中的技术指标要求。

表 1 极紫外相机技术指标要求

Tab.1 Technical index requirements for extreme ultraviolet camera

No.	Technical index item	Technical requirements
1	Azimuth adjustment range	-50°-50°
2	Azimuth pointing error	≤0.1°
3	Pitching adjustment range	15°-90°
4	Pitching pointing error	≤0.1°
5	Camera temperature	-15-70℃

为避免杂散光影响对地球等离子层的成像效果, 极紫外相机指向控制系统调整方位、俯仰机构之前, 太阳光线与极紫外相机光轴夹角应大于 50°, 太阳光线与极紫外相机光轴夹角的计算公式为:

$$x_{\text{sun}} = \cos(90 - \phi_{\text{sun}}) \cdot \cos(\theta_{\text{sun}})$$

$$y_{\text{sun}} = \sin(90 - \phi_{\text{sun}}) \cdot \cos(\theta_{\text{sun}})$$

$$z_{\text{sun}} = \sin(\theta_{\text{sun}})$$

$$x_{\text{earth}} = \cos(90 - \phi_{\text{earth}}) \cdot \cos(\theta_{\text{earth}})$$

$$y_{\text{earth}} = \sin(90 - \phi_{\text{earth}}) \cdot \cos(\theta_{\text{earth}})$$

$$z_{\text{earth}} = \sin(\theta_{\text{earth}})$$

$$\alpha = \arccos(x_{\text{sun}}x_{\text{earth}} + y_{\text{sun}}y_{\text{earth}} + z_{\text{sun}}z_{\text{earth}}) \quad (1)$$

式中: ϕ_{sun} 为太阳方位角; θ_{sun} 为太阳高度角; ϕ_{earth} 为地球方位角; θ_{earth} 为地球高度角; 太阳光线与极紫外相机初始发射坐标系 X、Y、Z 方向的夹角分别为 x_{sun} 、 y_{sun} 、 z_{sun} ; 地球与极紫外相机初始发射坐标系 X、Y、Z 方向的夹角分别为 x_{earth} 、 y_{earth} 、 z_{earth} ; 极紫外相机光轴指向地球中心时, 太阳光线与极紫外相机光轴夹角为 α 。

2 系统的构成及其工作原理

月基极紫外相机指向机构控制系统主要由系统控制处理器、步进电机控制处理器、电机驱动电路、指向机构和霍尔传感器等单元组成, 结构关系如图 1 所示。

月基极紫外相机指向机构控制系统的工作原理: 系统工作过程中, 系统控制处理器根据接收到的控制命令和参数决定方位、俯仰指向机构的控制方式和功能; 系统控制处理器通过数据总线和地址总线与电机控制处理器进行信息传递, 发送电机控制

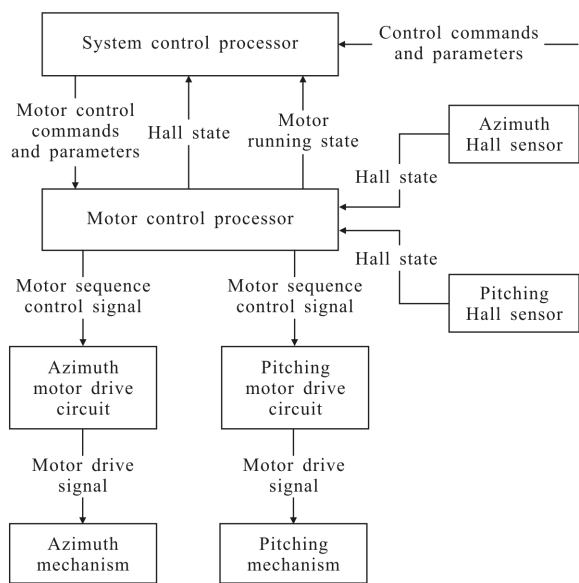


图 1 指向机构控制系统框图

Fig.1 Block diagram of pointing mechanism control system

命令和参数,接收电机运行状态及参数;采用霍尔传感器作为指向机构的定位器,系统控制处理器根据霍尔传感器反馈的霍尔状态、电机运行步数和方向、指向机构与霍尔传感器的标定结果计算并确定指向机构位置,实现方位、俯仰指向机构的控制算法;电机控制处理器根据电机控制命令及参数,按设计要求产生电机时序控制信号,并发送给方位、俯仰电机驱动电路;电机时序控制信号经过电机驱动电路处理后输出电机驱动信号,驱动电机运行,带动方位、俯仰指向机构运行到目标位置。

3 系统的设计

3.1 指向机构设计^[6-7]

指向机构可以通过方位和俯仰的运动,最终实现极紫外相机对地球等离子体层中心的指向。综合考虑登月工程对极紫外相机的技术要求,采用传统的地平式俯仰、方位转动轴系,其综合性能(体积、可靠性、重量、指向)较好,是指向机构的首选结构。轴系和传动系统是影响结构刚度和指向性能的关键环节,采用标准轴承组成俯仰、方位轴系。

俯仰转动机构由水平轴系、传动机构和支撑框架组成。一端采用一对角接触球轴承支撑,另一端采用深沟球轴承,可沿轴线自由移动,以补偿温度变化的影响。垂直轴系与水平轴系结构形式相同。轴承需

要选用特殊设计制造的低温轴承,经防冷焊固体润滑处理,以满足深空环境条件下的使用要求。根据使用的环境温度要求,轴系的预紧载荷应做合理估算,保证在大的温度变化范围内可靠运转。

方位电机与方位指向机构转动速比为 80:1,俯仰电机与俯仰指向机构转动速比为 90:1。极紫外相机指向机构模型参见图 2 所示。

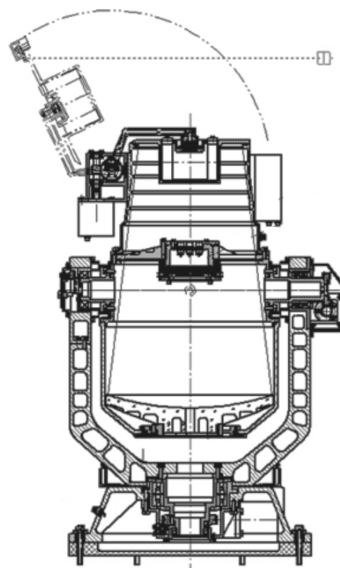


图 2 指向机构模型

Fig.2 Model of pointing mechanism

3.2 指向机构调整角度计算

根据极紫外相机方位角、极紫外相机高度角、地球方位角和地球高度角计算指向机构的调整角度,计算公式为:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{point}} &= \phi_{\text{earth}} - \phi_{\text{EUV}} \\ \theta_{\text{point}} &= \theta_{\text{earth}} - \theta_{\text{EUV}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ϕ_{earth} 为地球方位角; θ_{earth} 为地球高度角; ϕ_{EUV} 为极紫外相机方位角; θ_{EUV} 为极紫外相机高度角; ϕ_{point} 为方位指向机构调整角度; θ_{point} 为俯仰指向机构调整角度。

当 $\phi_{\text{point}} > 0$ 时,方位指向机构向 50° 方向调整,当 $\phi_{\text{point}} < 0$ 时,方位指向机构向 -50° 方向调整;当 $\theta_{\text{point}} > 0$ 时,俯仰指向机构向 90° 方向调整,当 $\theta_{\text{point}} < 0$ 时,俯仰指向机构向 15° 方向调整。

3.3 电机控制

采用步进电机作为指向机构的驱动元件,通过电机控制处理器对步进电机进行控制,步进电机时

序控制信号的频率为 200 Hz,控制方式为四相八拍^[8],电机正转时各相的通电顺序为 A→AB→B→BC→C→CD→D→DA,电机反转时各相的通电顺序为 D→DC→C→CB→B→BA→A→AD。电机控制处理器选用 Xilinx 公司的型号为 XC2V3000-4FG676C 的 FPGA。

方位和俯仰电机运行步数计算公式为^[9]:

$$\begin{aligned} N_\phi &= \phi_{\text{point}} K_\phi / J_\phi \\ N_\theta &= \theta_{\text{point}} K_\theta / J_\theta \end{aligned} \quad (3)$$

式中: N_ϕ 为方位电机运行步数; ϕ_{point} 为方位指向机构调整角度; K_ϕ 为方位电机与方位指向机构转动速比; J_ϕ 为方位电机步距角; N_θ 为俯仰电机运行步数; θ_{point} 为俯仰指向机构调整角度; K_θ 为俯仰电机与俯仰指向机构转动速比; J_θ 为俯仰电机步距角。

当 $N_\phi > 0$ 时,方位电机正转,当 $N_\phi < 0$ 时,方位电机反转;当 $N_\theta > 0$ 时,俯仰电机正转,当 $N_\theta < 0$ 时,俯仰电机反转。

为了保证霍尔传感器定位的精准性以及指向机构控制的可靠性,电机控制处理器对步进电机进行控制的过程中,如果霍尔传感器从无效变为有效时,电机控制处理器停止电机时序控制信号的输出,指向机构停止运动。

3.4 指向机构定位器的安装与标定

霍尔传感器的安装方式:在方位、俯仰指向机构调整范围内的两端各放置一个霍尔传感器,使两个霍尔传感器的有效范围不叠加,即方位、俯仰指向机构在调整范围内,中间部分两个霍尔传感器都无效,两端只有一个霍尔传感器有效。

霍尔传感器与指向机构位置的标定目的:在指向机构调整范围内,确定霍尔传感器有效的起始信号与指向机构位置的对应关系。

标定过程:首先调整指向机构和测量平台,用一台经纬仪对准测量平台上的精测镜,使指向机构处于预设的零点位置;然后控制指向机构移向霍尔传感器,当霍尔传感器从无效变为有效后,控制活动机构停止移动,用另一台经纬仪对指向机构上的精测镜;最后,两台经纬仪互瞄,计算指向机构与零点位置的变化量,即为霍尔传感器有效时指向机构相对零点的标定位置。

实验中俯仰、方位指向机构的预设零点位置分别为 45° 和 0° 。经测量,俯仰指向机构 90° 位置的霍

尔传感器标定位置为 79.73° , 15° 位置的霍尔传感器标定位置为 21.89° ;方位指向机构 50° 位置的霍尔传感器标定位置为 44.43° , -50° 位置的霍尔传感器标定位置为 -44.17° 。

3.5 基于霍尔传感器定位的控制算法^[10]

系统控制处理器根据指向机构调整角度和霍尔传感器标定位置对指向机构进行控制,为了保证指向机构的控制精度,消除累计误差,每次指向机构调整需要通过霍尔传感器定位准确位置,以准确位置为基准,调整指向机构到达目标位置,系统控制处理器选用 ATMEL 公司的型号为 AT697F 的 CPU,控制算法如下:

步骤一,如果指向机构的当前位置对应的两个霍尔传感器都无效,那么选择与指向机构的目标位置相对较近的霍尔传感器作为指向机构的定位器,控制指向机构向定位器移动,当定位器从无效到有效时,控制指向机构停止移动,计算指向机构需要移动的范围,控制指向机构移动到目标位置;

步骤二,如果指向机构的当前位置对应某个霍尔传感器有效,那么选择该霍尔传感器作为定位器,控制指向机构向另外一个霍尔传感器方向移动,当定位器从有效变为无效后,控制指向机构停止移动,再控制指向机构向定位器移动,当定位器从无效变为有效后,控制指向机构停止移动,计算指向机构需要移动的范围,控制指向机构移动到目标位置,如果指向机构未到达目标位置,并且另外一个霍尔传感器从无效变为有效,那么控制指向机构停止移动,重新计算指向机构需要移动的范围,控制指向机构移动到目标位置;

步骤三,如果指向机构的当前位置对应某个霍尔传感器有效,并且该霍尔传感器故障,那么选择另一个霍尔传感器作为定位器,控制指向机构向另外一个霍尔传感器方向移动,当定位器从无效变为有效后,控制指向机构停止移动,计算指向机构需要移动的范围,控制指向机构移动到目标位置;

步骤四,如果指向机构的当前位置对应的两个霍尔传感器都无效,并且与指向机构的目标位置相对较近的霍尔传感器故障,那么选择另一个霍尔传感器作为指向机构的定位器,控制指向机构向定位器移动,当定位器从无效到有效时,控制指向机构停止移动,计算指向机构需要移动的范围,控制指向机

构移动到目标位置。

3.6 指向机构控制系统的误差分析

经分析,指向机构控制系统的误差源包括:指向机构误差、霍尔传感器定标误差、指向机构调整角度计算误差和电机控制误差,计算公式为:

$$\begin{aligned} e_{\phi} &= e_{1\phi} + e_{2\phi} + e_{3\phi} + e_{4\phi} \\ e_{\theta} &= e_{1\theta} + e_{2\theta} + e_{3\theta} + e_{4\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: e_{ϕ} 为方位指向机构控制总误差; $e_{1\phi}$ 为方位指向机构误差; $e_{2\phi}$ 为方位霍尔传感器定标误差; $e_{3\phi}$ 为方位指向机构调整角度计算误差; $e_{4\phi}$ 为方位电机控制误差; e_{θ} 为俯仰指向机构控制总误差; $e_{1\theta}$ 为俯仰指向机构误差; $e_{2\theta}$ 为俯仰霍尔传感器定标误差; $e_{3\theta}$ 为俯仰指向机构调整角度计算误差; $e_{4\theta}$ 为俯仰电机控制误差。

指向机构误差 $e_{1\phi}$ 和 $e_{1\theta}$ 产生的主要原因是转动轴系空回,导致指向机构实际控制位置与目标位置的偏离。指向机构误差 $e_{1\phi}$ 和 $e_{1\theta}$ 的测量过程:通过反向控制电机单步运行,驱动指向机构,用经纬仪测量指向机构的位置变化情况,直到用经纬仪测量指向机构的位置开始变化,指向机构误差 $e_{1\phi}$ 和 $e_{1\theta}$ 的计算公式为:

$$\begin{aligned} e_{1\phi} &= N_{\phi} J_{\phi} / K_{\phi} \\ e_{1\theta} &= N_{\theta} J_{\theta} / K_{\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $e_{1\phi}$ 为方位指向机构误差; K_{ϕ} 为方位电机与方位指向机构转动速比; J_{ϕ} 为方位电机步距角; $e_{1\theta}$ 为俯仰指向机构误差; K_{θ} 为俯仰电机与俯仰指向机构转动速比; J_{θ} 为俯仰电机步距角;方位指向机构位置开始变化时, N_{ϕ} 为方位电机单步运行的最大步数;俯仰指向机构位置开始变化时, N_{θ} 为俯仰电机单步运行的最大步数。经实验测量 N_{ϕ} 为 3, N_{θ} 为 4,计算 $e_{1\phi}$ 为 0.034° , $e_{1\theta}$ 为 0.040° 。

霍尔传感器定标误差 $e_{2\phi}$ 和 $e_{2\theta}$ 由仪器测量误差和指向机构位置计算舍入误差组成。经分析,经纬仪测量误差和指向机构位置计算舍入误差均为 0.005° ,因此霍尔传感器定标误差 $e_{2\phi}$ 和 $e_{2\theta}$ 均为 0.01° 。

指向机构调整角度计算误差 $e_{3\phi}$ 和 $e_{3\theta}$ 由计算输入参数误差和调整角度计算舍入误差组成。经分析,计算指向机构调整角度的输入参数误差和调整角度计算舍入误差均为 0.005° ,因此指向机构调整角度计算误差 $e_{3\phi}$ 和 $e_{3\theta}$ 均为 0.01° 。

电机控制误差 $e_{4\phi}$ 和 $e_{4\theta}$ 由电机转动误差和电机

步数计算误差组成。经分析与测量,电机的转动误差较小,不大于一个步距角;电机步数计算误差不大于一步,因此电机控制误差 $e_{4\phi}$ 和 $e_{4\theta}$ 的最大值为电机运行两步对应指向机构的变化量,计算公式同公式(5),计算 $e_{4\phi}$ 为 0.023° , $e_{4\theta}$ 为 0.020° 。

根据公式(4)计算方位和俯仰指向机构控制总误差分别为 0.077° 和 0.080° ,均满足指向误差 $\leq 0.1^{\circ}$ 的技术要求。

4 月球表面工作实验

如表 2 所示,极紫外相机在月球表面的第 8 个月昼,方位、俯仰指向机构的控制结果表明,方位、俯仰指向机构控制误差 $\leq 0.1^{\circ}$,满足极紫外相机的技术指标要求。表 2 中的方位机构角度是极紫外相机与着陆器的相对方位角度,与按预设零点位置定义的方位角度的转换公式为:

$$\alpha = \beta + 150 \quad (6)$$

式中: α 为极紫外相机与着陆器的相对方位角度; β 为按预设零点位置定义的方位角度。

表 2 指向机构的控制结果

Tab.2 Control results of pointing mechanism

Time	Pointing mechanism	Aim position/($^{\circ}$)	Control result/($^{\circ}$)	Error/($^{\circ}$)
2014-07-16 22:15:41.593	Azimuth mechanism	147.2	147.17	0.03
2014-07-16 22:16:10.634	Pitching mechanism	38.2	38.25	0.05
2014-07-16 23:10:25.663	Pitching mechanism	28.2	28.24	0.04
2014-07-16 23:21:13.669	Pitching mechanism	38.2	38.16	0.04
2014-07-17 00:13:40.698	Azimuth mechanism	187.2	187.15	0.05
2014-07-17 00:14:17.658	Pitching mechanism	79.7	79.66	0.04

图 3 为 2013 年 12 月 24 日 10:27 极紫外相机在月球表面的拍摄图像,拍摄图像时太阳光线与极紫外相机光轴夹角为 61° ,通过图像可以看出,地球位于探测器成像的中间位置,表明极紫外相机实现了对地准确指向。

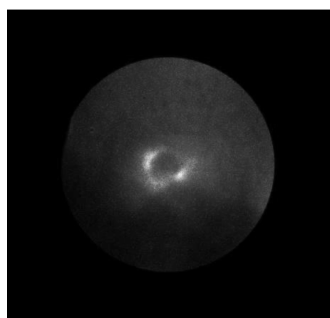


图3 月基极紫外相机图像

Fig.3 Lunar based extreme ultraviolet camera image

5 结论

根据月基极紫外相机的任务需求,设计并研制了指向机构控制系统,经过月球表面长时间工作验证,基于霍尔传感器定位的控制算法正确有效,指向机构控制系统能够实现准确的对地指向,指向控制误差 $\leq 0.1^\circ$,满足技术指标要求,在月基极紫外相机圆满完成科学观测任务的过程中起到了关键作用。

参考文献:

[1] Yan Wei, Ren Xin, Liu Jianjun, et al. The application of geometric positioning for Chang'E-3 Moon-based extreme ultraviolet camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0704002. (in Chinese)

[2] Wang Zhi, Li Zhaohui. Design of optical-mechanical structure for lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. *Opt*

Precision Eng, 2011, 19(10): 2427-2433. (in Chinese)

[3] Ni Qiliang, Bu Shaofang, Liu Shijie, et al. Precondition experiment research of microchannel plate photon counting imaging detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6): 658-663. (in Chinese)

[4] Li Zhaohui, Wang Zongsu, Hu Qinglong, et al. Design and stiffness analysis of tracking platform for lunar EUV camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(11): 2535-2541. (in Chinese)

[5] He Lingping, Chen Bo, Zhang Hongji, et al. Radiation calibration of EUV space cameras [J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24(5): 1036-1041. (in Chinese)

[6] Li Zhaohui. Opto-mechanical design of lunar based EUV camera for imaging the earth [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(10): 2352-2356. (in Chinese)

[7] Wang Zhi. Computation of the relationship between bearing preload of lunar-based two-dimensional turntable and system stiffness [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(6): 1831-1835. (in Chinese)

[8] Wang Yongcheng. Design and implement of test system for extreme ultraviolet camera electronic control unit [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2): 275-282. (in Chinese)

[9] Yu Tao, Xu Shuyan, Song Kefei. Auto-focusing system based on temperature for space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2085-2089. (in Chinese)

[10] 于涛. 基于霍尔传感器定位的活动机构控制方法: 中国, ZL201310529189.9[P]. 2016-01-13.