

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.j1702479

## 两档变焦距电视用摆动式镜组切换机构设计\*

徐新行<sup>1,2</sup> 张 飞<sup>3</sup> 夏文波<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049;  
3. 许昌职业技术学院 许昌 461000; 4. 通用电气(中国)研究开发中心有限公司 上海 201203)

**摘要:** 为了实现可见光电视的两档变焦,设计了一款高重复精度、小体积的镜组切换机构。首先根据可见光电视的光学设计结果和功能需求,提出了摆动式镜组切换机构的主要技术指标;然后,根据此指标开展了镜组支撑板、步进电机和伺服控制系统的详细设计或选择;在完成镜组切换机构和可见光电视的精密加工、装调后,对切换机构的切换时间、重复精度及可见光电视在两种焦距状态下的成像效果进行了实验检测与验证。结果表明,采用步进电机驱动、齿轮传动增扭、光电开关反馈、机械停挡精确定位、弹簧拉力保持等手段研制的镜组切换机构,不仅外形尺寸小(128 mm × 140 mm × 135 mm)、切换时间短(0.9 s)、重复精度高(方位、俯仰均不超过 20°),而且在可见光电视系统中的应用效果良好,为高性能、低成本变焦距电视的研制提供了一种新选择。

**关键词:** 可见光电视; 调焦; 摆动式; 切换机构; 重复精度

**中图分类号:** TH703 TG502.33 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

## Design of swing type switching mechanism for focusing lens group in visible light television system with double focal lengths

Xu Xinhang<sup>1,2</sup>, Zhang Fei<sup>3</sup>, Xia Wenbo<sup>4</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China; 3. Xuchang College of Vocational Technology Xuchang 461000, China; 4. GE (China) Research and Development Center Co. Ltd. Shanghai 201203, China)

**Abstract:** To realize the focusing of visible light television system with double focal lengths, a swing type switching mechanism for focusing lens group with high repeatability precision and small volume is designed. Firstly, the main specifications of the switching mechanism for focusing lens group are put forward on the basis of optical system design result and function requirements of visible light television. Then, according to the specifications, the support plate for the focusing lens groups, step motor and servo control system are designed or chosen in detail. After completing the fine manufacturing, assembling and adjusting of the switching mechanism for focusing lens group and visible light television system, the switching time, repeatability precision of the switching mechanism and the imaging effect of the visible light television in two focal lengths are tested and verified, respectively. The results show that the switching mechanism for focusing lens group developed by adopting step motor driven, gear transmission torque increasing, photoelectric switch feedback, mechanical stopping precise positioning, spring tension maintaining and etc. has the advantages of small outline dimension (128 mm × 140 mm × 135 mm), short switching time (0.9 s), high repeatability precision (azimuth and pitch angles less than 20°). The switching mechanism for focusing lens group has excellent application effect in visible light television system, which provides a new choice for the switching lens group in the development of high performance, low cost visible light television system with variable focal length.

**Keywords:** visible light television; focusing; swing type; switching mechanism; repeatability precision

收稿日期: 2017-08 Received Date: 2017-08

\* 基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDB-SSW-SLH014)项目资助

## 0 引 言

在光电经纬仪系统中,可见光电视作为实现目标捕获、跟踪与瞄准的核心设备之一,主要用于对可见光波段目标的捕获与跟瞄<sup>[1-4]</sup>。但由于车载光电跟瞄系统的机动性及大多数被跟踪目标的运动性,因此要求所设计的可见光成像系统具备必要的调焦变倍功能,即要求可见光电视不仅能够提供低放大倍数、大视场的图像来实现运动目标的捕获与跟踪,而且能够提供高放大倍数、小视场的图像来实现远距离目标的瞄准与锁定<sup>[5-8]</sup>。若采用双探测器的方式同时获得不同放大倍数的图像,势必大幅度增加可见光电视的体积、重量和功耗,进而对所搭载光电经纬仪的承载能力提出较高的要求,因此用于车载光电经纬仪的可见光电视常采用单探测器配合调节光学元件的方式来获得不同放大倍数的图像。该方式也是目前国内外最常用的相机变倍方式<sup>[9-12]</sup>。另一方面,变焦距光学系统按照其焦距的变化是否连续可分为连续变焦和非连续变焦两种。其中,连续变焦是通过连续改变透镜组及补偿镜组间的轴向间隙来实现光学系统焦距的连续变化。它的优点是可以根据目标距离的变化及时调节光学系统的焦距,不仅始终确保了目标在视场中的成像大小合适,而且避免了系统丢失目标的风险;而非连续变焦则是通过切换不同的透镜组进出光路来实现光学系统几个固定焦距的转换。它的突出优点是光学设计和调焦镜组的执行机构相对简单,而且不同焦距采用各自独立的镜组,即在不同的焦距状态下镜片数量可以有所不同,避免了光学系统不必要的能量损失<sup>[13-15]</sup>。

在两档或多档变焦的光学系统中,只要镜组切换机构的切换速度足够快,切换时机准确,跟踪算法合理,在焦距的切换过程中不丢失目标已不难实现<sup>[16-19]</sup>。如果各固定焦距选择适当,非连续变焦的光学系统不仅可以实现较好的跟踪效果,而且还可以获得较连续变焦光学系统更佳的成像质量。因此,两档或多档变焦的光学系统被越来越多地应用于光电跟瞄系统中<sup>[20-22]</sup>。

本文针对两档变焦距电视的光学系统,设计了一种摆动式镜组切换机构来实现系统的长短焦切换。该机构不仅结构简单、成本低廉,而且切换速度快、切换精度高,为非连续变焦成像系统的镜组切换提供了一种新选择。

## 1 镜组切换机构的设计要求

### 1.1 两档变焦距电视的光学系统

根据可见光电视系统的功能需求及其所搭载经纬仪的外形尺寸,设计光学系统如图 1 所示。由图 1 可知,该

光学系统包括长焦、短焦两档焦距分别对应于系统第 1 像面与探测器靶面之间的两组独立的透镜组。只要实现两透镜组在光路中的快速、精准切入或切出,即可实现可见光电视系统的长短焦变换功能。

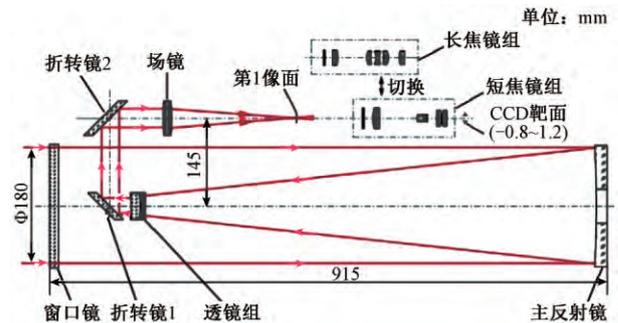


图 1 可见光电视的光学系统

Fig. 1 Optics system of visible light television

该两档变焦距可见光成像系统的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 两档变焦距电视的主要性能指标

Table 1 Main specifications of visible light television with two focal lengths

序号	项目	参数
1	波长/ $\mu\text{m}$	0.4~0.7
2	焦距/mm	1 500/750
3	口径/mm	$\Phi 180$
4	视场角/ $^\circ$	0.47/0.94

### 1.2 镜组切换机构的结构组成

目前,常用的镜组切换方式主要有圆周式切换和直线式切换两种<sup>[23-24]</sup>。其中,圆周式切换是指将各调焦镜组固定于同一个作圆周运动的框架上,驱动电机直接或通过减速齿轮副间接驱动负载框架,进而完成不同调焦镜组在光路中的切换。这种切换方式的优点是切换速度快、定位精度高,不足是结构复杂、外形尺寸较大。直线式切换是指将各调焦镜组固定于作直线运动的平台上,平台在步进电机的驱动和直线导轨的引导下带动镜组实现在光路中的切换。这种切换方式的优点是负载能力大、切换精度高,但它的切换速度较慢,容易丢失目标,而且在垂直于光路方向所需的尺寸较大,不利于光学镜头的小型化。本研究为了实现两档变焦距电视的小型化与快速变倍,选择小角度圆周摆动的切换方式,开展镜组切换机构的详细设计,其结构组成如图 2 所示。该切换机构主要由支撑基座、步进电机、中心轴、轴承、主动齿轮、从动齿轮、镜组支撑板、挡片、限位螺钉、光电开关、拉簧、短焦镜组和长焦镜组等组成。

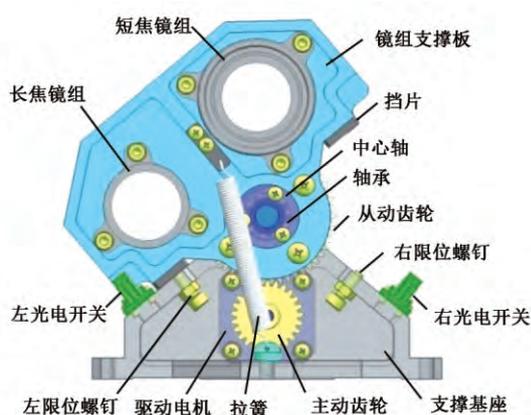


图2 镜组切换机构的结构组成

Fig. 2 Structure composition of the switching mechanism for focusing lens group

### 1.3 镜组切换机构的工作原理

在镜组切换机构中,步进电机与主动齿轮直接固连,用于为切换机构提供回转动力;齿轮副用于传递电机对镜组支撑板的回转驱动力,并实现减速增扭的效果;镜组支撑板与从动齿轮固连,同时通过中心轴和轴承实现与

支撑基座的活动连接。两调焦镜组固定在镜组支撑板上,并随镜组支撑板进行往复摆动。限位螺钉用于调节调焦镜组在光路中的准确位置,同时通过拉簧进行位置保持;光电开关用于控制步进电机的通断,并判断切换机构的位置状态。挡片采用耐磨损的钢材料制成,以保证切换机构的重复精度。

当切换机构处于短焦状态时,如图3(a)所示,镜组支撑板在拉簧的拉力作用下与左限位螺钉相接触,短焦镜组位于光路中。当需要将短焦镜组切出光路、长焦镜组切入光路时,控制步进电机逆时针回转,经减速齿轮副带动镜组支撑板顺时针回转,中间克服拉簧最长的中点状态,如图3(b)所示,直至镜组支撑板触发到右光电开关,控制步进电机断电。此时,镜组支撑板即在拉簧的拉力作用下与左限位螺钉相接触,实现长焦镜组在光路中的精确切入,如图3(c)所示。同样地,当需要将长焦镜组切出光路、短焦镜组切入光路时,控制步进电机顺时针回转,经减速齿轮副带动镜组支撑板逆时针回转,直至镜组支撑板触发到左光电开关,使步进电机断电。此时,镜组支撑板即在拉簧的拉力作用下与左限位螺钉相接触,实现短焦镜组在光路中的精确切入,如图3(a)所示。

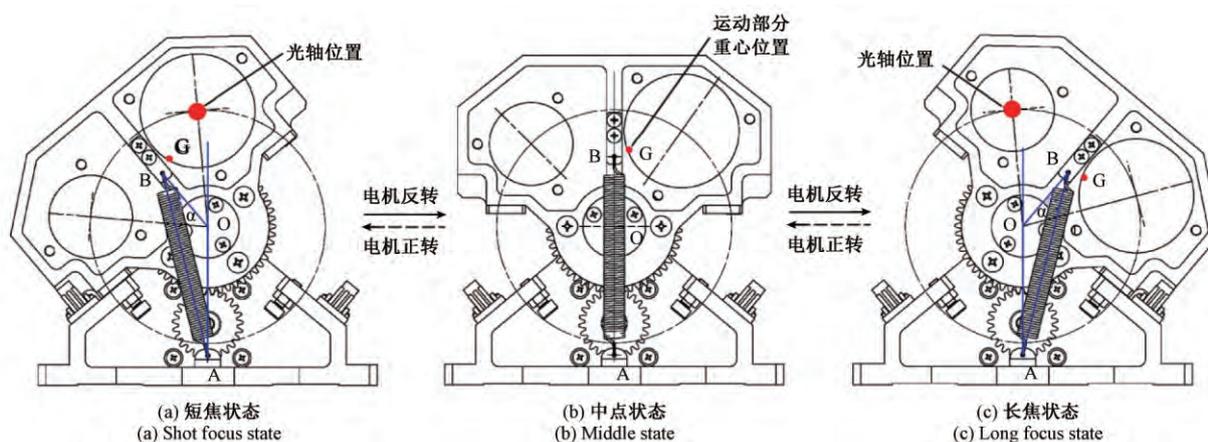


图3 镜组切换机构的工作过程

Fig. 3 Switching operation process of the switching mechanism for focusing lens group

由图3所示的工作原理可知,该镜组切换机构具有如下技术优势:1)采用齿轮副进行减速增扭,降低了机构对驱动电机的需求;2)由小角度的往复摆动取代传统圆周式切换机构的大角度翻转,不仅压缩了机构的体积,而且提高了镜组的切换速度;3)由廉价的光电开关取代昂贵的编码器进行位置判断,更加经济实用;4)由限位螺钉对镜组位置进行精确调节,并由拉簧对镜组位置进行保持,更加简单可靠。

### 1.4 镜组切换机构的指标需求

镜组切换机构的主要性能指标包括外形尺寸、负载能力、工作行程、切换速度和重复精度等。本研究中,完成精密加工、装调后,长、短焦镜组的外形尺寸分别为 $\Phi 32\text{ mm} \times 128\text{ mm}$ 和 $\Phi 44\text{ mm} \times 130\text{ mm}$ 。为了尽可能压缩切换机构的体积,尤其是垂直于光轴方向的尺寸,选择两调焦镜组并排紧凑布置。同时,结合光学系统的设计结果,确定镜组切换机构的主要性能指标如表2所示。

表 2 镜组切换机构的主要性能指标

Table 2 Main specifications of the switching mechanism for focusing lens group

序号	项目	参数
1	外形尺寸(不含调焦镜组)/mm	≤150×150×140
2	负载能力(包含镜组支撑板)/kg	≥0.73
3	行程/(°)	80
4	切换时间/s	≤1
5	重复精度/(")	≤20

## 2 镜组切换机构的设计

根据表 2 中所示镜组切换机构的性能指标要求,本文重点对镜组支撑板、步进电机和伺服控制系统等进行了详细设计或选择。

### 2.1 镜组支撑板的设计

为了尽量压缩镜组切换机构的体积,在保证机构切换功能的前提下,对其中最大尺寸的镜组支撑板进行了详细设计与模态分析,其结构外形如图 4 所示。

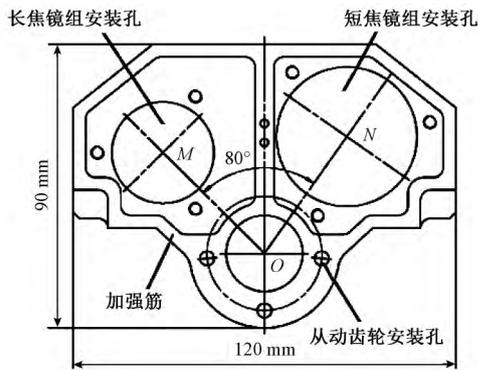


图 4 镜组支撑板的外形结构

Fig. 4 Outline structure of the support plate for focusing lens group

该镜组支撑板主要由矩形的镜组安装区和半圆形的从动齿轮安装区两部分组成,整体为对称式结构。其中,半圆的圆心  $O$  即为镜组支撑板的回转中心,两镜组安装孔与该回转中心连线的夹角,即为镜组切换机构的工作行程。完成详细设计后,该镜组支撑板的最大外形尺寸为  $120\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ ,两镜组安装孔中心  $M$ 、 $N$  与回转中心  $O$  连线的夹角为  $80^\circ$ 。另一方面,由于光学系统对调焦镜组切入光路的位置要求严格,而且在切换过程中镜组支撑板将受到一定程度的冲击,因此,要求镜组支撑板必须具有足够的结构刚度。如果刚度不足,不仅

会降低可见光电视的成像稳定性,而且会给切换机构在光路中的装调增加困难。所以,本研究对镜组支撑板进行了翻边加筋设计,以尽可能地增加它的结构刚度。图 5 所示为镜组支撑板的 1 阶、2 阶谐振频率分析结果。可知该镜组支撑板的 1 阶模态为  $1\ 200.5\text{ Hz}$ , 2 阶模态为  $1\ 298.7\text{ Hz}$ , 满足镜组切换机构的应用需求。

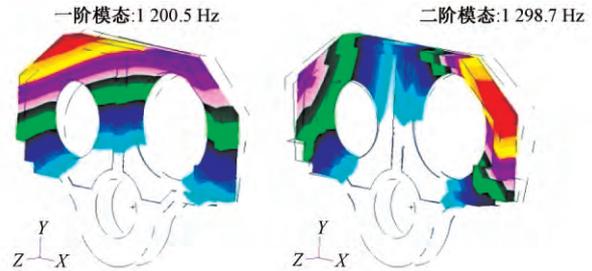


图 5 镜组支撑板的模态分析结果

Fig. 5 Modal analysis result of the support plate for focusing lens group

### 2.2 步进电机的选择

步进电机作为镜组切换机构的动力来源,其输出扭矩的大小是选择电机的重要指标之一。在镜组切换机构的工作过程中,它不仅要克服机构运动部分自身的重力  $mg$ 、拉簧的拉力  $F$  和齿轮副等传动部分的摩擦阻力  $f$ ,顺利实现镜组切换的功能,而且还要保证调焦镜组的切换速度足够快,以确保可见光电视在变焦过程中跟踪目标不丢失。图 6 所示为镜组切换机构运动部分在长焦状态的受力分析结果,可得步进电机所需输出扭矩  $P$  的计算如下:

$$P_1 = mg \cdot H \quad (1)$$

$$P_2 = F \cdot \sin\alpha \cdot r = K(L - L_0) \cdot \sin\alpha \cdot r \leq K(R + r - L_0) \cdot \sin\alpha \cdot r \quad (2)$$

$$p \geq n \cdot \left( \frac{P_1 + P_2}{i} + P_3 \right) \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)可得:

$$p \geq n \cdot \left[ \frac{mgH + K(R + r - L_0) r \sin\alpha}{i} + P_3 \right] \quad (4)$$

式(1)~(4)中,  $P_1$  为运动部分重力对回转中心  $O$  的扭矩,  $P_2$  为拉簧拉力对回转中心  $O$  的力矩,  $P_3$  为步进电机克服摩擦阻力所需的扭矩,  $H$  为运动部分重力到回转中心  $O$  的距离,  $K$  为拉簧的劲度系数,  $L$  为拉簧的长度,  $L_0$  为拉簧在自由状态下的长度,  $R$  为拉簧下固点  $A$  到回转中心  $O$  的距离,  $r$  为拉簧上固点  $B$  到回转中心  $O$  的距离,  $\alpha$  为拉簧与镜组支撑板对称线的夹角,  $i$  为切换机构齿轮副的减速比,  $n$  为步进电机输出扭矩的余度系数。

完成镜组切换机构的结构设计后,可得  $R = 50\text{ mm}$ ,

$r = 27 \text{ mm}$ ,  $\alpha_{\max} = 26^\circ$ ,  $H_{\max} = 26 \text{ mm}$ ,  $m = 0.73 \text{ kg}$ ,  $i = 2$ 。为了保证镜组切换机构在各焦距状态下的工作稳定性,拉簧的保持拉力必须足够大,据此选择拉簧的相关参数为  $L_0 = 50 \text{ mm}$ ,  $K = 2.3 \text{ N/mm}$ 。根据经验估计步进电机克服系统摩擦所需要的扭矩  $P_3 = 0.25 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,并取步进电机的余度系数  $n = 2$ ,以保证切换机构足够的启动加速度。将以上相关参数代入式(4)可得  $P_{\min} = 1.42 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

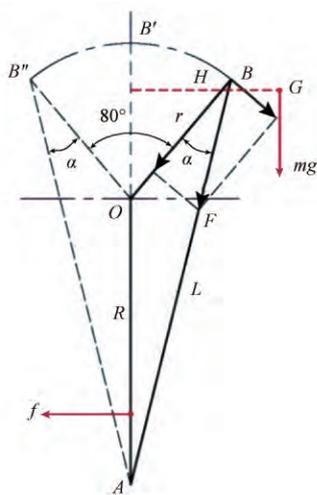


图6 镜组切换机构运动部分的受力分析

Fig. 6 Force analysis for the moving parts of the switching mechanism for focusing lens group

表3所示为所选用步进电机的主要性能指标。由表3可知,该步进电机外形尺寸小、输出扭矩大,满足镜组切换机构的应用需求。

表3 步进电机的主要性能指标

Table 3 Main specifications of the step motor

序号	项目	参数
1	主体外形尺寸/mm	42 × 42 × 80
2	减速比	5.18
3	最大输出扭矩/(N·m)	3
4	步距角/(°)	±1.8
5	额定电流/A	1.7

### 2.3 伺服控制系统的设计

图7所示为镜组切换机构所采用伺服控制系统的结构框图。首先根据左、右光电开关的通断情况判断切换机构的位置状态。待接收到控制指令后,再由功率级驱动步进电机回转(回转方向由镜组切换机构的起始状态决定),进而通过齿轮传动副带动调焦镜组回转。直到镜

组支撑板触发到光电开关,并将改变后的光电开关状态反馈给伺服控制器,以切断步进电机。最后,镜组支撑板在拉簧的拉力作用下,完成调焦镜组的最终切换,并将其保持在该焦距状态下。

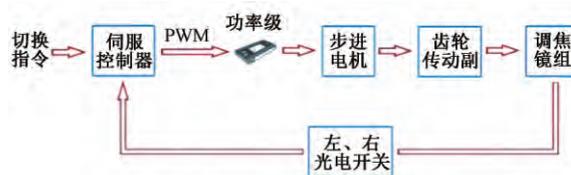


图7 伺服控制系统的组成结构

Fig. 7 Composition structure diagram of the servo control system

### 3 镜组切换机构的实验检测

在完成镜组切换机构的精密加工、装调后,获得长、短焦距镜组的重量分别为0.24和0.28 kg(与设计值相当),镜组切换机构的外形尺寸为128 mm × 140 mm × 135 mm(≤150 mm × 150 mm × 140 mm)。实际测得切换机构的平均切换时间为0.9 s(≤1 s),均满足可见光电视系统的应用需求。图8所示为该镜组切换机构及其在可见光电视系统中装调完成后的实物。



图8 可见光电视系统及镜组切换机构的实物

Fig. 8 Photograph of the switching mechanism for focusing lens group and visible light television system

此外,为了确保两档变焦距电视的调焦效果,重点对切换机构的重复精度及可见光电视的成像效果进行了实验检测与验证。

#### 3.1 镜组切换机构重复精度的实验检测

室温条件下,采用0.2"平行光管对镜组切换机构在两个焦距状态时的重复精度进行了实验检测,检测装置如图9所示。该装置主要由光学测试平台、平行光管、镜

组切换机构(包含两套装调完毕的调焦镜组)和电机控制系统等组成。检测步骤如下:首先将镜组切换机构固定于光学测试平台上,并完成与电机控制系统的连接,然后,调整平行光管使其与光路中某调焦镜组中的滤光片准直,并将光管读数置零;再由电机控制系统实现调焦镜组的切换,并记下新切入光路的镜组对应的光管读数。如此反复切换 9 次,记录下各次对应的光管读数值。实验结果如表 4 所示。

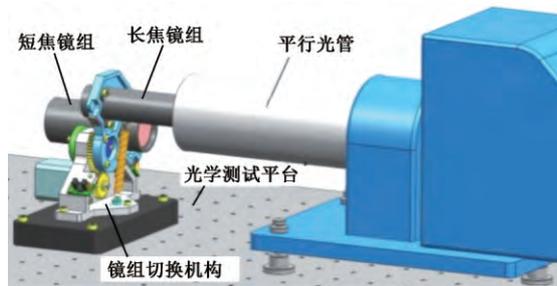


图 9 镜组切换机构重复精度的检测实验

Fig. 9 Repeatability precision test experiment of the switching mechanism for focusing lens group

表 4 镜组切换机构重复精度的实验测试结果

Table 4 Repeatability precision test experiment result of the switching mechanism for focusing lens group

序号	短焦镜组 (方位,俯仰)	长焦镜组 (方位,俯仰)
1	(0°, 0°)	(+6°, -8°)
2	(-6°, +2°)	(+8°, 0°)
3	(+6°, -4°)	(-2°, -6°)
4	(+4°, +8°)	(-8°, +2°)
5	(-8°, -6°)	(4°, 10°)

由表 4 可知,镜组切换机构的重复精度:方位不超过 16°,俯仰不超过 18°。满足光学设计对镜组切换机构重复精度( $\leq 20^\circ$ )的要求。

### 3.2 镜组切换机构调焦成像效果的验证

在完成镜组切换机构重复精度的检测及其在可见光电视中的光机装调后,在能见度为 25 km 的天气条件下,对可见光电视的成像效果进行了验证。图 10 所示为两种焦距状态下,可见光电视系统所拍摄的图像。由图像的清晰程度可知,本研究所设计的镜组切换机构切换位置准确、重复精度高,能够满足光学设计的应用要求。



(a) 短焦状态  
(a) Shot focus state



(b) 长焦状态  
(b) Long focus state

图 10 两种焦距状态下可见光电视拍摄的图像

Fig. 10 The captured images with the visible light television system under two focal lengths

## 4 结 论

与连续变焦的可见光电视相比,两档或多档变焦的光学系统更加简捷与实用,因此被越来越多地应用于可见光成像系统中。本文为了实现两档变焦距电视的小型化与快速变倍,选择小角度摆动的切换方式取代传统的大角度翻转,采用步进电机驱动、齿轮传动增扭、光电开关反馈、机械停挡精确定位、弹簧拉力保持等成功研制了一款摆动式镜组切换机构。该机构不仅制作成本低、外形尺寸小,而且切换速度快、重复精度高,在可见光电视系统中的应用效果良好,也为其他低成本、高性能非连续变焦成像系统的制作提供了一种新选择。

### 参考文献

- [1] 孙航,韩红霞,曹立华,等. 大型光电经纬仪速度环 PID 参数模糊自整定研究[J]. 仪器仪表学报, 2013,

- 34(10): 2388-2394.
- SUN H, HAN H X, CAO L H, et al. Study of fuzzy PID controller parameter self-tuning for velocity circuit of large theodolite [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(10): 2388-2394.
- [2] 江山, 张锐, 韩广良, 等. 复杂背景灰度图像下的多特征融合运动目标跟踪[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 320-328.
- JIANG SH, ZHANG R, HAN G L, et al. Moving object tracking based on multi-feature fusion in the complex background gray image [J]. Chinese Journal of Optics, 2016, 9(3): 320-328.
- [3] 程龙, 陈娟, 陈茂胜, 等. 光电跟踪系统快速捕获时间最优滑模控制技术[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 148-154.
- CHENG L, CHEN J, CHEN M SH, et al. Fast acquisition of time optimal sliding model control technology for photoelectric tracking system [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 148-154.
- [4] 汪济洲, 鲁昌华, 蒋薇薇. 一种基于随机场多运动目标跟踪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 909-913.
- WANG J ZH, LU CH H, JIANG W W. New multi-target tracking algorithm based on conditional random field [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(6): 909-913.
- [5] 孙明超, 熊文卓, 刘剑. 机载中波红外两档变焦光学系统[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(增刊12): 36-39.
- SUN M CH, XIONG W ZH, LIU J. Airborne mid-wavelength infrared switch-zoom optical system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(Suppl. 12): 36-39.
- [6] 马优恒, 赵磊, 赵振海, 等. 车载光电系统跟踪精度的分析与提高[J]. 激光与红外, 2016, 46(10): 1268-1272.
- MA Y H, ZHAO L, ZHAO ZH H, et al. Analysis and improvement of tracking precision in vehicle-mounted electro-optical system [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(10): 1268-1272.
- [7] LI J, FAN H P, XIE Z Y, et al. Analysis of the development and the prospects about vehicular infrared night vision system [C]. Proceedings of SPIE, 2013: 891215.
- [8] 周俊鹏, 陈健, 李焱, 等. 舰载光电跟踪设备的目标预测算法研究[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 519-528.
- ZHOU J P, CHEN J, LI Y, et al. Research on target prediction algorithm of shipboard photoelectric tracking equipment [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(2): 519-528.
- [9] 伞兵, 李景林. 大口径反射光学系统调焦机构设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(增刊2): 329-332.
- SAN B, LI J L. Focusing device design of the large aperture optics system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(Suppl. 2): 329-332.
- [10] RYU J M, GANG G M, LEE H K. Optical design and fabrication of a large telephoto zoom lens with fixed/2.8 and light autofocus lens [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2015, 19(6): 629-637.
- [11] MANN A A. Developments and trends in infrared zoom lenses from 2000 to 2010 [J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 177-182.
- [12] YOSHITSUGU K, BITO T. Zoom lens system, imaging device and camera, US, US8004772 [P]. 2011.
- [13] 苏东风, 贾继强, 刘波, 等. 航空相机偏心凸轮调焦机构中的滚子运动轨迹[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1472-1477.
- SU D F, JIA J Q, LIU B, et al. The trajectory of roller in offset cam focusing mechanism for aerial camera [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(10): 1472-1477.
- [14] 林兆华, 米阳, 葛兵. 一种粗精结合的快速图像自动调焦算法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10): 28-31.
- LIN ZH H, MI Y, GE B. Algorithm of rapid autofocus combining rough and fine adjustment [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(10): 28-31.
- [15] 周程灏, 王治乐, 朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发展现状[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 25-38.
- ZHOU CH H, WANG ZH L, ZHU F. Review on optical synthetic aperture imaging technique [J]. Chinese Journal of Optics, 2017, 10(1): 25-38.
- [16] 周运义, 王臻. 三档变焦镜头中旋转切换变焦机构设计[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(4): 94-98.
- ZHOU Y Y, WANG ZH. Design of a switching focus machine based on whirllig in three focuses camera [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(4): 94-98.

- [17] 刘韬,胡玥,董健,等. 激光主动照明光学系统设计[J]. 中国光学,2016,9(3): 342-348.  
LIU T, HU Y, DONG J, et al. Design of laser active illumination optical system [J]. Chinese Optics, 2016, 9(3): 342-348.
- [18] 杨会生,李志来,樊延超,等. 空间相机均力输出式调焦机构[J]. 光学精密工程,2016,24(4): 796-803.  
YANG H SH, LI ZH L, FAN Y CH, et al. Focusing mechanism with equal output forces for space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 796-803.
- [19] 于潇,姚园,徐正平. 采用APD阵列的共口径激光成像光学系统设计[J]. 中国光学,2016,9(3): 349-355.  
YU X, YAO Y, XU ZH P. Laser imaging optical system design with a shared aperture employing APD array [J]. Chinese Journal of Optics, 2016, 9(3): 349-355.
- [20] 常军,沈本兰,王希,等. 宽谱段、动态局部高分辨离轴主动反射变焦系统[J]. 光学精密工程,2016,24(1): 7-13.  
CHANG J, SHEN B L, WANG X, et al. Off-axis reflective active zoom system with broad spectrum and dynamic local high-resolution [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 7-13.
- [21] 王槐,代霜,范磊,等. 可见光粗跟踪成像镜头光机结构设计[J]. 仪器仪表学报,2017,38(5): 1190-1197.  
WANG H, DAI SH, FAN L, et al. Opto-mechanical structure design of visible light rough tracking and imaging lens [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1190-1197.
- [22] 梅贵,翟岩,苗健宇,等. 星载离轴多光谱相机焦平面的装调与检测[J]. 中国光学,2016,9(4): 491-500.  
MEI G, ZHAI Y, MIAO J Y, et al. Focal plane alignment and testing for an off-axis multispectral space borne camera [J]. Chinese Journal of Optics, 2016, 9(4): 491-500.
- [23] 徐新行,李莹. 可见光电视用高精度小体积调焦平台的设计[J]. 光学精密工程,2017,25(6): 1526-1533.  
XU X H, LI Y. Design of focusing mechanism with high precision and small volume for visible light television system [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1526-1533.
- [24] 陈彦彤,徐伟,朴永杰,等. 航天高分辨相机运动机构检测系统研究[J]. 电子测量技术,2015,38(2): 113-117.  
CHEN Y T, XU W, PIAO Y J. The research of motion detection system in high resolution space camera [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(2): 113-117.

#### 作者简介



徐新行(通信作者)2015年于中国科学院长春光机所获得博士学位,现为中国科学院长春光机所副研究员,主要研究方向为光电对抗及跟瞄设备的设计。

E-mail: xxh123321xxh@163.com

**Xu Xinhang** (Corresponding author) received Ph. D. from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics in 2015. He is currently an associate research fellow in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research interests include designing of electro-optical countermeasure and tracking & pointing equipment.