

文章编号 1004-924X(2017)06-1526-08

## 可见光电视用高精度小体积调焦平台的设计

徐新行<sup>1\*</sup>, 李莹<sup>2</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. 长春大学 旅游学院, 长春 130122)

**摘要:**为了实现可见光电视的距离和温度调焦功能,设计了一款高精度、小体积的调焦平台。根据可见光电视的光学设计结果及功能需求,提出了调焦平台的主要技术指标。依据此指标展开了高精度直线电机、精密直线导轨、高刚度平台基座及调焦量计算公式的详细设计、选择与解算。其中,高性能元器件的采用确保了调焦平台自身的运行性能,调焦量计算公式的精准解算保证了可见光电视的调焦效果。在完成调焦平台的精密加工和装调后,采用电感仪和平行光管分别对调焦平台的行程、分辨力、全行程精度及其对可见光电视的温度调焦效果进行了实验检测与验证。结果表明:所设计的调焦平台体积小(80 mm×90 mm×30 mm)、行程大(-2.5 mm~+2.5 mm)、分辨力(6 μm)和全行程精度高(方位、俯仰方向偏差均不超过 10'')、调焦量计算公式准确,能够保证可见光电视系统距离和温度调焦功能的实现。

**关键词:**可见光电视;光学系统;调焦平台;高精度;小体积

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172506.1526

## Design of focusing mechanism with high precision and small volume for visible light television system

XU Xin-hang<sup>1\*</sup>, LI Ying<sup>2</sup>

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

2. Tourism College of Changchun University, Changchun 130122, China)

\* Corresponding author, E-mail: xxh123321xxh@163.com

**Abstract:** A high-precision and small-volume focusing mechanism was designed to realize the distance and temperature focusing functions of the visible light television. Based on the optical design results and functional demands of the visible light television, the main technical indices of the focusing mechanism were proposed. Then, precise linear motor and exact linear guides were chosen, platform base with high stiffness was designed in detail, and formula of focusing distance were calculated, according to the technical indices. The application of high-performance elements and components had ensured the operation performance of the focusing mechanism itself and the resolving of accurate calculation of focusing formula had ensured the focusing effect of the visible light television. Finally, stroke, resolution and precision of focusing mechanism were tested by inductive micrometer and autocollimator upon the completion of precision machining and adjustment of the focusing mechanism. The results show

收稿日期:2016-06-21;修订日期:2016-09-21.

基金项目:国家 863 计划资助项目(No. 2011AA7031024G)

that: the designed focusing platform has small volume ( $80\text{ mm}\times 90\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ ), large stroke ( $-2.5\text{ mm}\sim +2.5\text{ mm}$ ), high resolution ( $6\text{ }\mu\text{m}$ ) and high precision of total stroke (azimuth and pitching deviations are no more than  $10''$ ); and the calculation formula of the focusing amount is correct, which can guarantee the realization of system distance and temperature focusing functions for visible light television.

**Key words:** Visible light television; optical system; focusing platform; high-precision; small-volume

## 1 引言

近年来,光电经纬仪的捕获跟踪技术有了长足发展<sup>[1-4]</sup>。一方面,经纬仪捕获探测系统所覆盖的波段已经十分宽泛,红外相机、可见光电视和激光测距机几乎已成为应用于光电对抗领域经纬仪的标准配置<sup>[5-7]</sup>。另一方面,经纬仪的复合轴控制技术已经日趋成熟。在大惯量、大跟踪范围跟踪架的基础上配置小体积、高精度的快速反射镜以弥补大中型经纬仪跟踪精度的不足也已成为常用方法<sup>[8-12]</sup>。随着光电经纬仪捕获跟踪能力的提高及光电经纬仪应用领域的拓展,对大口径、长焦距、高分辨力相机的需求也越来越多。

在光电经纬仪系统中,可见光电视是实现目标捕获与跟踪的核心设备之一,它主要用于对可见光波段目标的捕获与跟踪<sup>[13-16]</sup>。部分车载光电跟瞄系统需要具备行进中跟踪的功能,而且大多数跟踪目标本身存在机动性,即光电经纬仪到跟踪目标的距离不断发生变化,从而造成像点离散而产生离焦,因此要求所设计的可见光成像系统必须具备距离调焦补偿功能。此外,由于车载平台存在振动、冲击和高低温等不利因素,尤其是高低温变化将引起系统光学元件和机械支撑元件的变形,进而导致像面漂移而产生离焦。因此,为了确保可见光成像系统在整个跟踪过程中均获得清晰的目标像,在光学系统中设置可进行温度调焦补偿的元件也十分必要<sup>[17-20]</sup>。

鉴于目前市场上小尺寸、高精度调焦平台的稀缺及光电跟瞄设备苛刻的工作温度范围( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim +55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),直接采购成品平台进行调焦补偿几乎是不可能的。因此,在完成可见光电视光学系统中调焦元件的选择后,如何设计小体积、高精度、高环境适应性的电动调焦平台来顺利实现可见光电视系统的温度、距离调焦补偿成为了本文研究的重点。

## 2 可见光电视用调焦平台的设计要求

### 2.1 可见光电视的光学系统

根据可见光电视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。该可见光成像系统的主要性能指标如表 1 所示。

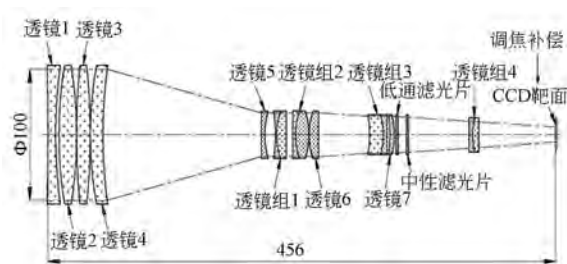


图 1 可见光电视的光学系统

Fig. 1 Optical system of visible light television

表 1 可见光电视的主要性能指标

Tab. 1 Requisite performance of visible light television

序号	项目	数值
1	工作波段	$0.4\text{ }\mu\text{m}\sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$
2	焦距	1 000 mm
3	相对孔径	1/10
4	视场角	$0.34^{\circ}$
5	像元大小	$12\text{ }\mu\text{m}\times 12\text{ }\mu\text{m}$
6	靶面尺寸	$4.8\text{ mm}\times 3.6\text{ mm}$

无论是距离调焦还是温度调焦,其目的都是为了调节目标像点的位置或 CCD 靶面的位置,以确保 CCD 的冷平面始终落在光学系统的焦平面上,进而保证可见光电视最终的成像质量<sup>[13-15]</sup>。由图 1 可知,尽管该光学系统所涉及的镜片较多,但几乎没有两侧空气间隔均适于安放调焦平台进而实现其前后移动的透镜。而且,各镜片之间的空气间隔要求极其严格,均不宜用作调焦元件。因此本光学系统选定 CCD 靶面(即可见光探测

器)进行前后移动,来实时补偿可见光电视在成像过程中的离焦现象。

## 2.2 调焦平台的结构组成

目前,常用的调焦方式主要由凸轮调焦和丝杠螺母调焦。其中,凸轮调焦具有调焦精度高、抗冲击振动性能优异等优点,但结构复杂,加工及装调工艺性差,多用于调焦范围较大的系统中。而丝杠螺母调焦不仅结构紧凑、加工制造方便,而且通过选配高精度的电机与导轨也能实现较高的调焦精度,因此被越来越多地用作光学系统的调焦机构,尤其是在小范围的调焦补偿领域<sup>[19]</sup>。本研究为了实现可见光电视系统的距离和温度调焦,选用丝杠螺母调焦方式进行调焦,高精度调焦平台的结构组成如图 2 所示。该调焦平台主要由平台基座、直线电机、消隙螺母、直线导轨、移动平台、位移传感器和探测器过渡座等组成。其中,直线电机和消隙螺母用于为移动平台提供直线动力;两个直线导轨用于实现移动平台和平台基座之间的运动副连接,并为移动平台提供直线导向;位移传感器用于实时监测移动平台的位置,以便于实现调焦平台的自动或手动控制;移动平台和探测器过渡座用于为探测器提供安装基准。

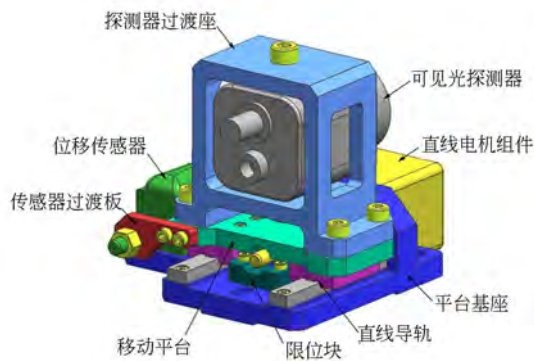


图 2 调焦平台的结构组成

Fig. 2 Components of focusing mechanism

## 2.3 调焦平台的指标需求

调焦平台的主要性能指标包括:外形尺寸、负载能力、行程、分辨力和调焦精度等。由于调焦平台用于带动可见光探测器进行前后移动,而探测器的外形尺寸仅为:35 mm×35 mm×52 mm,所以该调焦平台的外形尺寸(尤其是长度)将直接影响可见光电视的长度,因此调焦平台越紧凑越好。而对调焦平台负载能力的要求是:必须远大于可

见光探测器和探测器过渡座的重量,不仅要确保直线导轨不被压坏,而且要求平台能够在电机额定力矩的驱动下带着探测器自由移动。对调焦平台行程的要求是:必须大于距离和温度调焦所需要的最大补偿范围。而调焦平台的分辨力是指直线电机最小输入脉冲对应的调焦平台的位移量,它不得超过光学系统的半倍焦深<sup>[18]</sup>。而对调焦精度的要求是:在满足光学系统对可见光探测器与主光轴同轴度要求的前提下,平台全行程内的调焦误差越小越好。

根据以上分析和该可见光电视光学系统的设计结果,对调焦平台的性能指标提出了严格的要求,如表 2 所示。

表 2 调焦平台的主要性能指标

Tab. 2 Requisite performance of focusing mechanism

序号	项目	数值
1	外形尺寸(不含探测器)	$\leq 80 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$
2	负载能力	$\geq \pm 1.8 \text{ kg}$
3	行程	$\geq \pm 1.5 \text{ mm}$
4	分辨力	$\leq 10 \mu\text{m}$
5	方位误差	$\leq 10''$
6	俯仰误差	$\leq 10''$

## 3 可见光电视用调焦平台的设计

为了实现调焦平台如表 2 中所示的性能指标,本研究分别从高精度直线电机、精密直线导轨、高刚度平台基座和调焦量计算公式等方面进行详细设计、选择与推算。

### 3.1 高精度直线电机的选择

为了尽可能地压缩调焦平台的体积,本研究选用丝杠螺母型直线电机来为调焦平台提供动力。图 3 为本研究所选择直线电机组件的实物照片。如图所示,该电机主要由步进电机主体、驱动丝杠和消隙螺母 3 部分组成。其中,步进电机主体为电机的定子,而驱动丝杠和消隙螺母为电机的动子。当直线电机通电工作后,电机驱动丝杠回转,继而通过螺纹连接副将丝杠的回转运动转变为消隙螺母的直线运动,以实现电机直线动力的输出及驱动力的大幅放大。该直线电机相比普通型步进电机的突出优势是:省去了电机输出轴

与驱动丝杠的连接件(即省略了联轴节),不仅使调焦平台的结构更加紧凑,降低了装调难度,而且有利于提高调焦平台的工作可靠性。此外,消除螺母消除了驱动丝杠与螺母间的空回,提高了调焦平台的运动精度。

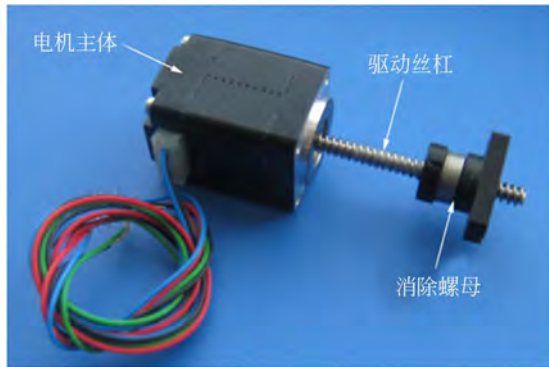


图3 调焦平台用直线电机组件的实物照片

Fig.3 Photograph of linear motor for focusing mechanism

表3列出了本研究所选用直线电机的主要性能指标。由表3可知:该直线电机结构紧凑、推力大、步长小,并且能够在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内正常工作,满足调焦平台对电机体积、推力、步长及高低温性能的要求。

表3 直线电机组件的主要性能指标

Tab.3 Requisite performance of linear motor components

序号	项目	数值
1	电机主体尺寸	28 mm×28 mm×32 mm
2	丝杠直径	Φ4.76 mm
3	最大推力	115 N
4	步距角	±1.8°
5	步长	6.3 μm
6	工作温度	-40 °C ~ +130 °C

### 3.2 精密直线导轨的选择

图4为本研究所选用高精度直线导轨的实物照片及其外形尺寸。

该导轨组件主要由直线轨道和滑移平台两部分组成。直线轨道与滑移平台之间通过多排钢球间接接触,从而将运动副的滑动摩擦转变为滚动摩擦。这不仅有效减小了调焦平台运行过程中的摩擦阻力,而且有利于提高直线导轨的使用寿命。直线轨道、滑移平台及钢球三者之间以微小的过

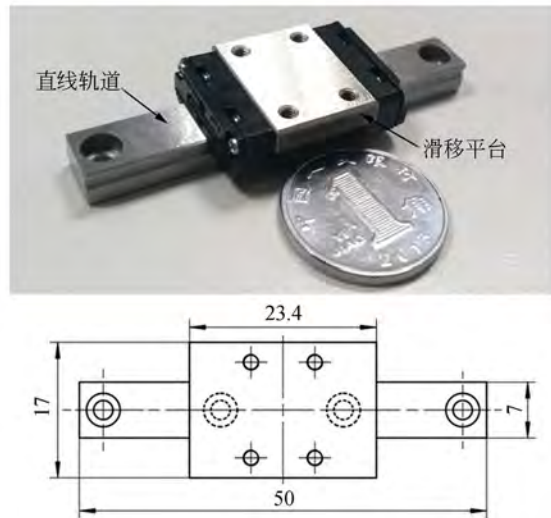


图4 直线导轨组件的实物照片及其外形尺寸

Fig.4 Photograph and size of linear guider

盈量(约 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ )装配而成,在导轨运动副表面均匀涂敷耐受高低温的航空润滑脂,从而保证导轨副即使面临较大的工作温差时,也能实现无间隙运动,最终保证了调焦平台的运动重复精度。

### 3.3 高刚度平台基座的设计

由于调焦平台的各结构组件均是通过平台基座进行集成与连接的,尤其是两套直线导轨,它们均在平台基座上实现等高与平行性调整。此外,调焦平台与可见光电视的连接也必须通过平台基座来实现。因此,平台基座的结构刚度十分重要。如果结构刚度不足,将难以保证直线导轨的自身精度(全行程 $\leq 1.0\text{ }\mu\text{m}$ ),最终限制调焦平台的精度及可见光电视环境稳定性的提高。

图5(a)(彩图见期刊电子版)为平台基座的有限元网格划分结果。由图可知,模型共包括26 989个Nodes,16 592个Elements。该“L”型平台基座主要包括电机安装板、导轨安装板和传感器安装板3部分,基座整体采用铝合金材料经机械加工制成,并且在不影响基座功能的前提下进行了适量的轻量化处理。图5(b)(彩图见期刊电子版)为平台基座的1阶、2阶谐振频率分析结果。由图可知:平台基座的1阶模态为2 191.8 Hz,2阶模态为3 724.1 Hz,远远大于可见光电视系统的应用需求。该平台基座的刚度薄弱点出现在传感器安装板处,表明基座的导轨安装基准面更加稳定可靠。因此,该平台基座的设计满足应用需求。

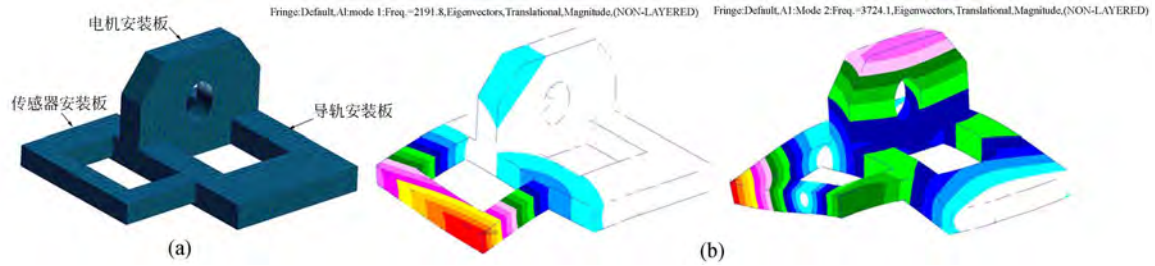


图 5 平台基座的有限元模型及模态分析结果

图 5 Finite element model and analyze results of platform base

### 3.4 调焦量计算公式的解算

在完成调焦平台硬件部分的设计后,还必须解算出距离、温度调焦量的计算公式,才能最终实现可见光电视的调焦补偿功能。

#### 3.4.1 距离调焦量计算公式的解算

由几何光学的成像原理可知:物距、像距和焦距三者之间存在如下关系:

$$\frac{1}{W} + \frac{1}{X} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

式中,  $f$  为光学系统的焦距,  $W$  为物距,  $X$  为像距。由式(1)可知,对于焦距一定的光学系统,当被测目标的距离发生改变时,像距随之改变。

$$X_1 = f \frac{W_1}{W_1 - f}, \quad (2)$$

$$X_2 = f \frac{W_2}{W_2 - f}, \quad (3)$$

$$\Delta X = X_2 - X_1 = \frac{f^2 (W_1 - W_2)}{(W_2 - f)(W_1 - f)}, \quad (4)$$

式(4)即为解算出的距离调焦量的计算公式。式(2)~(4)中:  $W_1$  为变化前的物距,  $W_2$  为变化后的物距,  $X_1$  为变化前的像距,  $X_2$  为变化后的像距,  $\Delta X$  为距离调焦量。

具体的距离调焦过程为:当被测目标与可见光电视的间距发生变化时,首先由激光测距机测得目标的距离,再将变化前的物距、像距等参数代入公式(4)计算出调焦平台的调焦量;然后,根据调焦量计算结果进行调焦,根据结果正负确定调焦平台的移动方向。最后,调焦平台在位移传感器的监测下,带着探测器移动至理论位置,可见光电视的距离调焦完成。

#### 3.4.2 温度调焦量计算公式的解算

不同于距离调焦量计算公式的推导过程,可见光电视的温度调焦量需要根据光学系统的设计结果来拟合。表 4 列出了可见光电视观测无穷远

目标时探测器的调焦量与环境温度之间的对应关系,其中,当调焦量为负值时表示逆着光线传播的方向移动。

表 4 不同温度条件下探测器的调整量

Tab. 4 Focusing distance of CCD at different temperatures

序号	温度 $T / ^\circ\text{C}$	调整量 $\Delta Y / \text{mm}$	序号	温度 $T / ^\circ\text{C}$	调整量 $\Delta Y / \text{mm}$
1	-50	-1.20	7	10	-0.16
2	-40	-1.03	8	20	0
3	-30	-0.86	9	30	0.17
4	-20	-0.64	10	40	0.38
5	-10	-0.48	11	50	0.54
6	0	-0.30	12	60	0.71

通过最小二乘法对表 4 中数据进行拟合解算,获得探测器的调焦量  $\Delta Y$  与环境温度  $T$  之间的计算公式如下:

$$\Delta Y = -4e-6T^2 + 0.017T - 0.320. \quad (5)$$

相应的温度调焦过程为:当可见光电视的工作温度发生改变时,首先由温度传感器测得可见光电视内部的实际温度,进而通过公式(5)计算出调焦平台的调焦量;再由位移传感器测得移动平台的实际位置,并通过与平台零位、平台调整量对比后,判断调焦平台的移动方向与移动量;最后,在直线电机的驱动及位移传感器的监测下,由调焦平台带着探测器沿光轴方向移动至理论位置,即可完成可见光电视的温度调焦。

## 4 可见光电视用调焦平台的实验检测

在完成可见光电视用调焦平台的精密加工、装调后,最终调焦平台的外形尺寸为:80 mm×90 mm×30 mm。采用电感仪测得平台的实际行程

与设计行程相当,约为 $-2.5\text{ mm}\sim+2.5\text{ mm}$ ;平台的分辨力与直线电机的步长相当,约为 $6\text{ }\mu\text{m}$ ,均满足可见光电视的应用需求。但为了确保可见光电视的调焦效果,本研究重点对调焦平台的运行精度及其对可见光电视的温度调焦补偿效果进行了实验检测与验证。

#### 4.1 调焦平台运行精度的实验检测

室温条件下,采用 $0.2''$ 平行光管对调焦平台的全行程精度进行了实验检测,检测装置如图 6 所示。该装置主要由光学测试平台、平行光管、调焦平台、平台控制板和平面反射镜等组成。检测步骤如下:首先,将调焦平台固定于光学测试平台上,并将平面反射镜粘贴于调焦平台的探测器过渡座上。然后,由平台控制板将调焦平台驱动至零位,此时,调整平行光管使其与平面反射镜准直,并将光管读数置零;再由平台控制板将调焦平台分别驱动至 $0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、-0.5、-1.0、-1.5、-2.0、-2.5\text{ mm}$ 等位置,由平行光管测得相应位置的方位、俯仰偏差值。最后,将各测量结果在坐标系中绘制出来,如图 7 所示。即

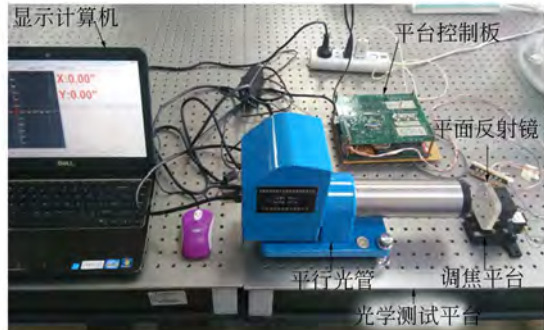


图 6 调焦平台运行精度的实验检测

Fig. 6 Test experiment for precision of focusing mechanism

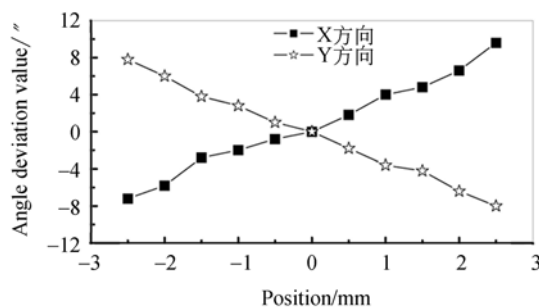


图 7 调焦平台运行精度的检测结果

Fig. 7 Precision testing results of focusing mechanism

可完成调焦平台精度的测量。

由图 7 可知:调焦平台的全行程( $-2.5\text{ mm}\sim+2.5\text{ mm}$ )误差方位不超过 $10''$ ,俯仰误差不超过 $8''$ ,在平台的应用行程内( $-1.5\text{ mm}\sim+1.5\text{ mm}$ ),误差值更小。结果显示:所设计平台调焦精度满足光学设计的要求( $\leq 10''$ )。

#### 4.2 调焦平台对可见光电视温度调焦效果的验证

本文所设计的可见光电视主要用于 $10\text{ km}\sim 20\text{ km}$ 远距离目标的捕获与跟踪,由公式(4)可知,此种条件下系统的离焦现象并不明显。因此,本文重点对调焦平台的温度调焦补偿效果进行了实验验证,实验装置如图 8 所示。该装置主要由可见光电视镜头、调焦平台及探测器、平台控制系统、监视器、温度传感器和电吹风等组成。具体的实验步骤如下:首先,将可见光电视镜头对准远处目标,并调节探测器的位置,直至监视器上获得清晰的目标像。存储该图像,同时由温度传感器测得当前的温度值(约为 $21^\circ\text{C}$ )。然后,采用电吹风对可见光电视镜头均匀、缓慢地加热,直至镜头内部温度达到并稳定在 $50^\circ\text{C}$ 附近,观察监视器上图像的变化情况并存储。接着,启动平台控制系统,即可完成可见光电视的温度调焦补偿。同时,观察监视器上图像的变化,并进行图像存储。最后,通过对比温度变化前后和温度调焦补偿后的图像(如图 9 所示),获得调焦平台对可见光电视系统的温度调焦补偿的实际效果。

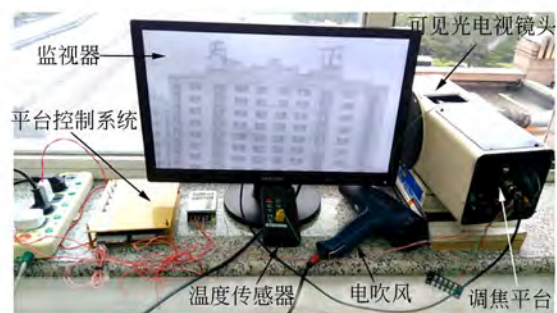


图 8 调焦平台对可见光电视的温度调焦补偿实验

Fig. 8 Testing experiment for temperature focusing effect

由图 9 可知:随着温度的升高,可见光电视系统产生了明显的离焦;而启动调焦平台控制系统后,图像迅速恢复至离焦前的状态。由此可知:所设计的调焦平台能够根据外界的温度变化自动完



(a) 温度变化前 (b) 温度变化后 (c) 调焦补偿后  
 (a)Before temperat- (b)After temperature (c)After focusing  
 ure changed changed compensation

图 9 温度变化前后和温度调焦补偿前后的图像对比

Fig. 9 Different images contrast of test experimant

成系统离焦量补偿,满足可见光电视对调焦平台温度调焦功能的需求。

## 5 结 论

可见光电视是光电经纬仪中实现目标捕获与

跟踪的重要设备之一,而调焦平台作为实现可见光电视距离和温度调焦补偿的重要组件,它的体积和运行精度一定程度上决定了可见光电视的体积和成像质量。本文通过分析可见光电视用调焦平台的指标需求,完成了高精度直线电机和精密直线导轨及高刚度平台基座的设计和调焦量计算公式的解算。最终研制了一种高精度小体积的调焦平台,并对该调焦平台进行了主要性能指标检测和温度调焦补偿实验。结果表明,本文所研制的调焦平台相对于可见光电视的应用需求而言:具有体积小( $80\text{ mm}\times 90\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ )、行程大( $-2.5\text{ mm}\sim +2.5\text{ mm}$ )、分辨力( $6\text{ }\mu\text{m}$ )和运行精度高(方位、俯仰方向偏差均不超过 $10''$ )等优点,配合准确的调焦量计算公式,该调焦平台能够可靠保证可见光电视系统距离和温度调焦功能的顺利实现。

## 参考文献:

- [1] 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 Optics*, 2016, 9(3):320-328. (in Chinese)
- [2] 彭树萍,李博,姜润强,等. 光电跟踪系统的双模控制[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):335-342.  
PENG SH P, LI B, JIANG R Q, *et al.*. Dual mode control for electro-optical tracking systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):335-342. (in Chinese)
- [3] PATTELLI L, SAVO R, BURRESI M, *et al.*. Spatio-temporal visualization of light transport in complex photonic structures [J]. *Light: Sci. & Appl.*, 2016, 5, doi:10.1038/lssa.2016.90.
- [4] 白帅. 空间二维光电转台的高稳定捕获跟踪技术研究[D]. 上海:中国科学院大学, 2015.  
BAI SH. *Research on highly stable acquisition and tracking technologies of space two-axis optoelectronic gimbals* [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [5] 王伟国,刘廷霞,李岩,等. 用于三轴转台的卫星跟踪策略[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3):871-878.  
WANG W G, LIU T X, LI Y, *et al.*. Secondary planet tracking tactic arithmetic for three-axis turn-  
table [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):871-878. (in Chinese)
- [6] 王素华,沈湘衡,叶露. 光电经纬仪作用距离的室内检测模型[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 744-749.  
WANG S H, SHEN X H, YE L. Indoor test model for photoelectric theodolite operating range [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 744-749. (in Chinese)
- [7] 闫海霞,刘岩俊,王东鹤. 光电经纬仪动态误差修正方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9):3030-3035.  
YAN H X, LIU Y J, WANG D H. Correction method of dynamic error of optoelectronic theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9):3030-3035. (in Chinese)
- [8] 陈少全,王宏柯,郑磊刚,等. 激光武器复合轴跟踪瞄准的稳定性分析[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(4): 94-97.  
CHEN SH J, WANG H K, ZHEN L G, *et al.*. The stabilization analysis of laser weapons' compound-axis tracking and pointing [J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(4):94-97. (in Chinese)
- [9] PARK W H, ANDREW C, CHO M, *et al.*. Flexure design development for a fast steering mirror [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014: 88360W.
- [10] 徐新行,韩旭东,王兵,等. 机载刚性支撑式快速控制反射镜设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24

- (1):126-133.
- XU X H, HAN X D, WANG B, *et al.*. Design of fast steering mirror with rigid support structure for airborne platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (1): 126-133. (in Chinese)
- [11] 王帅, 吴庆林, 张斌, 等. 用于快速反射镜的压电陶瓷驱动系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38 (7):6-10.
- WANG SH, WU Q L, ZHANG B, *et al.*. Design of the PZT driver system for fast steering mirror [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(7):6-10. (in Chinese)
- [12] 方楚, 郭劲, 徐新行, 等. 压电陶瓷驱动 FSM 三自由度柔性支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10):2987-2994.
- FANG CH, GUO J, XU X H, *et al.*. Design of three DOFs flexure support for FSM driven by piezoelectric ceramics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10):2987-2994. (in Chinese)
- [13] 李刚, 杨名宇. 基于联合变换相关的机载航空相机像移测量[J]. 中国光学, 2015, 8(3):401-406.
- LI G, YANG M Y. Image motion measurement for airborne camera based on joint transform correlation [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3):401-406. (in Chinese)
- [14] 黄晓娟, 康圣, 刘侃. 航空可见光相机成像质量影响因素分析[J]. 光学与光电子技术, 2014, 12(4): 65-69.
- HUANG X J, KANG SH, LIU K. Analysis of image quality influencing factors of aero visible camera [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(4):65-69. (in Chinese)
- [15] 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 Optics*, 2016, 9 (3):349-355. (in Chinese)
- [16] 张凯, 何欣, 刘强. 空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. 红外, 2014, 35(9):10-14.
- ZHANG K, HE X, LIU Q. Analysis and suppression of stray light in space borne visible light camera [J]. *Infrared*, 2014, 35 (9): 10-14. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [18] 董斌, 田海英, 郑丽娜, 等. 机载航空侦察相机调焦机构设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 73-80.
- DONG B, TIAN H Y, ZHENG L N, *et al.*. Design of auto-focusing gear on airborne reconnaissance camera [J]. *OME Information*, 2010, 27 (12):73-80. (in Chinese)
- [19] 李志来, 樊延超, 宁永慧, 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.
- LI ZH L, FAN Y CH, NING Y H, *et al.*. Focusing mechanism with equal output forces for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 796-803. (in Chinese)
- [20] 吕世良, 刘金国, 王晓茜. 对地观测高分辨率TDICCD相机调焦控制系统设计[J]. 中国光学, 2015, 8(6):1013-1019.
- LV SH L, LIU J G, WANG X Q. Design of re-focusing system for a high resolution TDICCD earth observation camera [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8 (6):1013-1019. (in Chinese)

#### 作者简介:



徐新行(1983-)男,河南周口人,博士,副研究员,2015年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,目前主要从事光电跟瞄设备的设计与研究。E-mail: xxh123321xxh@163.com