

# 激光反导系统中的电视瞄准镜

王 敏

(福建省光学技术研究所, 福州, 350013)

**摘要:** 长焦变焦镜头用于军事瞄准时, 变焦过程中较大的光中心漂移, 降低瞄准精度。阐述了在长焦变焦镜头的设计、研制中, 所采用的特殊设计和生产工艺, 它们较好地解决了光中心漂移、小型化设计、自动控制等问题。

**关键词:** 变焦距 光中心漂移 小型化 自动化

## TV sight lens in an antimissile system

Wang Ming

(Fujian Optical Technology Institute, Fuzhou, 350013)

**Abstract:** When zoom lens are used for military sighting, the drift of optical center caused by the change of focus length will reduce the sighting accuracy severely. In order to solve the problem, we employed two sets of compensation lenses, called conjugation lens sets, to eliminate the image plane shift. Also this paper discussed the miniaturization design, manufacture technology and automatic control of the system.

**Key words:** changing focal length optical center drift miniaturizing design automation

## 引 言

用于军事跟踪、瞄准的电视摄像镜头, 目前国内外仍以定焦镜头为主。需要变倍的, 也往往采用切换变倍的方式。其主要原因是由于变焦镜头在连续变焦过程中“光中心漂移”, 它与光学、机械件的偏心差、变倍镜组运动轨迹偏差有关<sup>[1]</sup>。切换变焦存在目标图像大小突变、易丢失等缺点。也有采用二个或三个摄像镜头来实现间断变倍, 以此满足大中小视场要求, 但这样往往又使系统部件增多, 体积重量增加, 同时也存在切换时目标图像突变的问题<sup>[2]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 Moulton P F. IEEE J Q E, 1982; QE18(8): 1185
- 2 Welford D, Moulton P F. Opt Lett, 1988; 13(11): 975
- 3 Singh S, Smith R C, Vanvitert L G. Phys Rev, 1974; 10(6): 2556
- 4 L F World, 1991; 27(11): 9
- 5 Shen H Y, Lian T Q, Zeng R R *et al.* IEEE J Q E, 1989; 25(2): 144
- 6 Shen H Y, Zhou Y P, Zeng R R *et al.* J A P, 1991; 70(6): 3373

\*

\*

\*

作者简介: 沈鸿元, 男, 1937年8月出生。研究员, 博士生导师。现从事激光非线性晶体、结构、性能、器件及其相互关系的研究, 以及新颖激光器和激光医疗机的研究。

用户在其激光反导系统中决定采用连续变焦镜头作电视瞄准, 要求焦距  $f' = 135\text{mm} \sim 800\text{mm}$ , 光轴偏(变倍全过程)  $< 1'$ , 重复定位精度  $< 2''$ , 目视鉴别本领  $> 100\text{lp/mm}$ , 密封充氮, 总重量  $10\text{kg}$  左右。我们在设计研制过程中, 以用户所提出的要求为目标, 从光学结构设计, 生产工艺多方面试制改进, 较好地解决了光轴偏、重复定位精度、自动控制、小型化设计等问题, 并通过了高低温、振动、运输例行试验, 主要性能指标全面达到并超过了用户提出的要求。

## 1 总体方案

### 1.1 光学设计方案

变焦系统有两大类, 一类是光学补偿系统, 另一类是机械补偿系统<sup>[3]</sup>。我们采用的是机械补偿系统, 因为本系统焦距长(800mm),

变倍比大( $6^{\times}$ ), 光学补偿不能满足要求。如图 1 所示。它是一个正组补偿系统。这种补偿系统体积小, 变化率快。它是通过  $i_2$  变倍组向右移动, 焦距变长,  $i_3$  补偿组向左移动, 补偿像面位移。对  $i_2, i_3$  每一瞬间的运动关系可用微分方程表示<sup>[3]</sup>:

$$[(1 - m_2^2)/m_2^2]f'_2 dm_2 + [(1 - m_3^2)/m_3^2]f'_3 dm_3 = 0 \quad (1)$$

式中,  $m = h'/h = l'/l = u'/u'$  是垂轴放大倍数, (1)式的含义: 变倍组位移引起像面移动量与补偿组位移引起像面位移代数之和为零。像面位移可以用共轭距改变量表示, 扩大到整个变焦过程<sup>[3]</sup>

$$\sum dL_i = 0 \quad (2)$$

即所有运动组分的共轭距任何瞬间的微分改变量之和必须为零。变倍补偿组经过换根处理<sup>[3]</sup>, 它的运动轨迹如图 2 所示。光学系统设计了滤色片、十字丝辅助光路。

### 1.2 结构设计方案

由于跟踪瞄准目标在 5km 以外, 头部在镜头调试时调准固定。变倍部分采用凸轮变倍结构, 变焦过程输出焦距值电信号。可变光栏设计成等转角五片式结构, 可以进行光圈自动控制。滤色片光轴十字丝设计成转盘结构, 可根据需要切换所需的滤色片或光轴十字丝, 光轴十字丝中心

代表的是光轴中心, 后方电中心与其对中, 就实现了光电中心的重合, 方便准确。滤色片和光轴十字丝转换过程还输出状态信号。

## 2 “光中心漂移”的控制

理想的光学系统是一个共轴系统, 但在实际生产过程中, 光学镜片、机械镜座存在偏心差。运动部件存在运动轨迹偏差, 因而会造成变焦过程中光中心漂移。

### 2.1 配合间隙造成不规则偏心

我们要将其控制在最小范围内, 如前后固定组, 它的偏心差在装好以后是固定的, 它给系统带来的是球差、慧差等像质影响, 要将影响控制在像差容限范围内。一般通过提高对镜片定心磨边要求, 机械镜筒的同轴度要求, 可以做到。

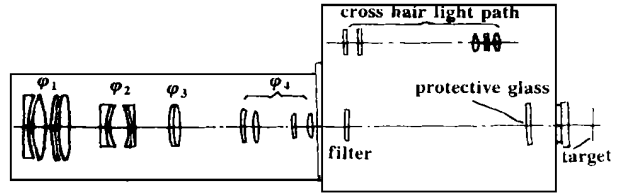


Fig. 1 Optical system

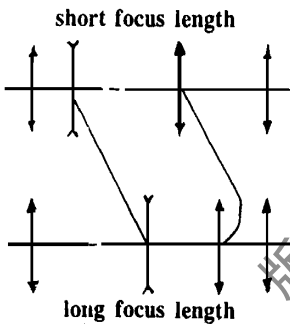


Fig. 2 Motion diagram of positive group compensation system

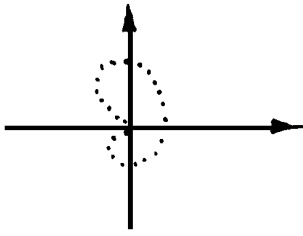


Fig. 3 Optical center target

变倍组镜座、补偿组镜座同样存在配合间隙偏心差,也用与前后固定组相同的方法解决。

### 2.2 运动轨迹偏差造成机械中心与光学中心不一致

这需要用调整机构在装校时消除。变倍组、补偿组在运动过程中由于偏心差的存在,造成光轴与机械轴不一致。系统光中心在靶面上的投影也随之漂移,其轨迹如图3所示。由于不同焦距时,其漂移的大小方向各不相同,校正就很困难。

从变倍补偿结构组成来分析解决。我们采用的凸轮机械

补偿式变倍结构,它由变倍组、补偿组、导杆、凸轮等组成,如图4所示。首先由电机带动凸轮转动。凸轮槽中的导轮拖动变倍组、补偿组沿轴向移动。产生运动轨迹偏差的主要因素有:

#### 2.2.1 导杆的不直

通过选材、时效、较直处理,保证导杆每100mm不直度 $< 0.01\text{mm}$ ,整根导杆不直度 $< 0.02\text{mm}$ 。还对导杆进行表面处理,使镜座导套在导杆上移动轻滑。

#### 2.2.2 导套与导杆之间存在间隙,间隙会带来中心偏

在镜座和导杆之间设计导套,导套连着镜座在导杆上滑动,其好处是减小由间隙带来的中心偏。加长了的导套,同样的间隙,带来的中心偏减小了,从下式可以看出。偏折角:  $\text{tg } \alpha = \Delta d / L$  式中,  $\Delta d$  是轴套间隙;  $L$  是导套长度。

#### 2.2.3 导轮与凸轮槽的配合间隙

用导轮代替以往的导钉,并在导轮材料上选用耐磨、光滑的尼龙,这样导轮和凸轮槽之间滚动摩擦系数小,磨损小,使用过程不易加大间隙,滚动轻便,可使用微型电机带动,噪声小。导轮在凸轮槽中滚动轻滑,几乎没有空回。由于较好地解决了上述三个问题,就有效地控制了运动轨迹偏差。

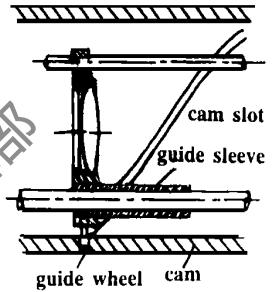


Fig. 4 Mechanism of cam enlargement-factor-varying

### 2.3 光中心十字丝光路和滤色片转换机构

#### 2.3.1 结构选择

在国外同类产品中,光中心十字丝(测试卡)是固定的,使用时把灯打开,用反射率30%的反射镜将图像成在摄像管靶面上,但反射镜要固定在光路中,光通量会损失30%,由于跟踪瞄准镜头片数多,透过率只有80%左右,再损失30%,就只剩下50%~60%,这显然不合适。还有用活动反射镜,只要在每次使用时能准确定位也能达到目的。但它需要较大的空间,要加长后截距,使整个镜头加长,这不利于系统的小型化。分析比较,我们将四种滤色片和光中心十字丝光路等角分布在转盘上,如图5所示。

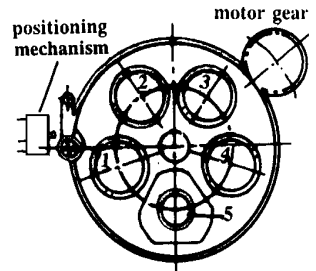


Fig. 5 Mechanism of filter swivel plate  
1, 2, 3, 4—four filters  
5—cross hair light path

可根据需要选择滤色片或光十字丝,将其转入主光路。转盘由电机通过齿轮带动,定位机

构将其准确定位在主光路。这要求每次转换有较高的重复定位精度。我们通过对定位机构的多次改进,重复定位精度可 $< 1''$ 。

### 2.3.2 光十字丝的校准

光十字丝中心代表的是镜头光中心,它极大地方便了瞄准系统的装校。只要把光中心十字丝转入主光路,镜头对着亮处,十字丝就成像在靶面上。把摄像机电中心调整到与十字丝中心重合即可。光中心十字丝应成像在靶面上。装校时将十字丝像面调节到正确位置(靶面上),再调节镜头头部前固定组,使镜头像面与十字丝像面重合。十字丝中心应与光轴重合,因此,十字丝辅助光路应可微量径向摆动。装校时通过反复变倍找出光中心点,再调节十字丝辅助光路连接座上的调节螺钉,将十字丝与光中心重合后固定牢固。

### 2.3.3 滤色片的调校

转盘上的滤色片如果平行度差,也将使光轴出现偏折。我们对滤色片逐片检测边厚差,并标记最厚点,将边厚差较小并相同的四种滤色片做一组,装在转盘上,并将最厚点统一朝内(外),消除换片差。对统一的偏差 $\Delta y$ ,在十字丝径向微调时一并消除。

我们通过以上几个方面的努力,成功控制了光中心漂移,在整个变倍过程中光中心漂移 $< 15''$ ,重复定位精度 $< 1''$ 。

## 3 镜头的小型化和自动化设计

### 3.1 变倍凸轮的小型化设计

为了镜头的小型化,必须尽量减小变倍组焦距,本系统 $f'_{\text{变}} = -52.187$ ,已经相当小,但由于系统焦距要求 $f' = 135\text{mm} \sim 800\text{mm}$ ,凸轮导程仍达 $120\text{mm}$ 。系统变倍补偿位移曲线如图 6 所示,为使变倍补偿组在凸轮槽移动自如,凸轮升角要控制在 $35^\circ$ 以内,凸轮槽通常由数控铣床开通槽。通槽会变形,一般中间变宽。凸轮槽长,转角大,变形加剧。槽的变形间隙使移动镜组产生纵向偏移。为控制偏移量,凸轮槽转角不应大于 $120^\circ$ 。如图 6 所示。

$$\text{tg}35^\circ = 120 / (1/3\pi D) \quad (3)$$

式中, $D$ 是凸轮直径; $35^\circ$ 是最大升角。 $D = 120 \times 3 / (\pi \text{tg}35^\circ) = 164\text{mm}$ 。由计算得出凸轮直径 $\bar{i} = 164\text{mm}$ ,但还存在问题,补偿组曲线在长焦末端有一段升角<sup>[2]</sup>特大,达 $70^\circ$ ,显然走不动,如果整体调整,凸轮直径将达 $640\text{mm}$ ,即使分段改变升角凸轮直径仍将达 $220\text{mm}$ 。这样镜头体积重量将严重超标。因此,我们否定了这一常规的设计方法,采用特殊的设计方法和加工工艺,凸轮直径 $\bar{i} = 74\text{mm}$ 。

### 3.2 焦距值信号输出

图 7 中用转角变量表示焦距值变量。只要使电位器与凸轮同步转动,不同转角代表不同焦距,电位器输出不同阻值,由此实现焦距值信号的输出。测出若干电位器电阻值对应的焦距值,以此可绘出焦距-电阻坐标曲线图(如图 7)。用户使用,只要测出电阻值,依据坐标曲线可以得到此时的焦距值,这

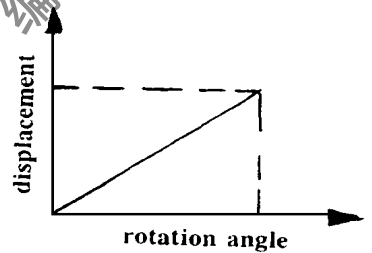


Fig. 6 Diagram of rotation angle-displacement

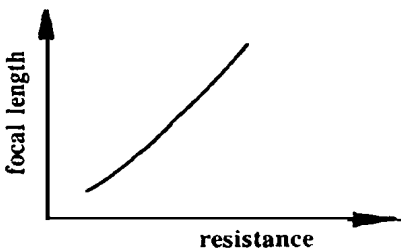


Fig. 7 Curve diagram of focal length versus resistance

用户使用,只要测出电阻值,依据坐标曲线可以得到此时的焦距值,这

一参数对用户是十分有用的。

### 3.3 调光系统

由于跟踪瞄准系统使用环境照度变化可达 5000 倍以上。根据用户需要,采用多重调光装置。一般可包括:自动(电动)光阑,滤色片切换,变光密度盘。

#### 3.3.1 可变光阑

自动光阑要求能全关闭,并能随外界光强的变化自动调节光阑大小。一般圆片光阑片数多,在光孔越小时转角越小,不能用于自动控制。我们设计的 5 片式光阑,片数少,拨动轻松。但也存在光阑从最大到关闭转角小(一般只有  $20^\circ$  左右)的问题,太小的转角在自动控制时会因电机的惯性产生振荡。为了解决这个问题(如图 8 所示),让光阑齿轮不直接带动环,而是通过凸轮和杠杆来带动光阑动环。这样光阑齿轮转角可任意扩大,一般扩大到  $90^\circ$  左右,用直流伺服电机带动凸轮转动,凸轮转动带动杠杆摆动,杠杆拨动光阑动环。光阑每变一档,所需的转角可以按需要给出,特意让光阑孔径越小时变化越缓慢,这样有利于强光时自动控制,不易产生振荡。在前几型的产品中,装上自动光圈控制板,实现了光圈自动控制,并且不产生振荡。

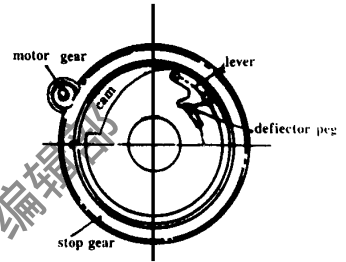


Fig. 8 Lever mechanism of stop cam

#### 3.3.2 滤色片切换

具体结构前面已谈及,切换状态信号输出,通过一组触片开关的通断信号组合,表示当前滤色片或十字丝状态。

#### 3.3.3 变光密度盘机构

通过结构改进设计,在整个转动过程中消除了由于基片楔角引起的光轴偏折。变光密度盘可由电机带动,通光率随转角而变化,也可与自动控制线路板配合,实现自动调光控制。

## 4 技术指标

总体密封、充氮,并顺利通过高温( $+50^\circ$ ),低温( $-40^\circ$ ),振动( $15\sim 25\text{Hz}$ ,加速度  $3.5\text{g}$ ),  $200\text{km}$ , 三级公路运输试验。主要技术指标:目视鉴别率  $> 120\text{lp/mm}$ ; 变焦过程光中心漂移  $< 15''$ , 重复定位精度  $< 2''$ ; 镜头总重量  $< 11\text{kg}$ ; 外型尺寸:  $510\text{mm} \times 160\text{mm}$ 。

本课题在研制过程中得到西南技术物理所于志文副研究员、苏心智主任的支持和帮助,在论文完成过程中得到赖爱光、林丽诚、蔡长达等专家的有益启发和热情指导,在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 蔡长达. 激光与红外, 1996; (6): 30~ 31
- 2 赖爱光, 蔡长达. 光学仪器, 1996; (6): 13~ 18
- 3 陶纯堪. 变焦距光学系统设计. 第一版, 北京: 国防工业出版社, 1998: 10~ 11

作者简介: 王 敏, 女, 1963 年 4 月出生。工程师。从事光学仪器结构设计工作。

收稿日期: 1997-10-28 收到修改稿日期: 1998-07-13