

# 变焦距系统像点漂移的校正

黄 玮

**摘要:** 本文从几何光学的原理出发, 分析论证了变焦距系统组元的中心偏差与倾斜对像点漂移的影响, 并且提出了通过选定参考物点和控制组元中心偏差校正像点漂移的方法。

## 一、引 言

在变焦距系统中, 通常概念的像移是指变焦过程中像点的轴向移动, 其意义在于像面的轴向移动。本文所讨论的所谓“像点漂移”与“像面轴移”是两个不同的概念, 像点漂移是指在变焦过程中, 由于运动组元的倾斜和中心偏差所引起的像点偏离理想位置的横向移动。对于普通的摄影变焦距系统, 像点漂移是无关紧要的。但是对于大变倍比的跟踪测量变焦距系统, 像点漂移的影响是不容忽视的。由于某些敏感的光机元件公差控制不严, 则可导致测量错误, 甚至中心像点偏出视场。本文从理想光学原理出发, 对于变焦距系统中由于变焦元件倾斜和中心偏差所引起的像点漂移量做了定量的分析讨论, 并试图找出校正像点漂移的途径, 实际证明, 该途径是可行的。

## 二、像点漂移量的计算

### 1. 仅存在中心偏差的光学元件所引起的像点漂移<sup>[1]</sup>

单一光学元件, 如果它只存在中心偏差, 设它的偏差量为  $\delta$ , 见图 1。

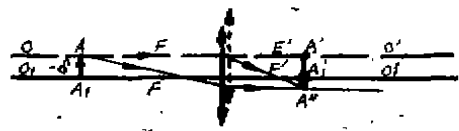


图 1

如图 1 所示, 光学元件无中心偏差时的理想光轴为  $OO'$ , 当存在中心偏差  $\delta$  时, 实际光轴相对于理想光轴移动了  $\delta$ , 它为  $O_1O_1'$ 。为同理想光学规定的符号一致, 规定实际光轴位于理想光轴之上,  $\delta$  为正, 实际光轴位于理想光轴之下,  $\delta$  为负。无中心偏差时的轴上点  $A$ , 经无偏差元件成像于  $A'$ , 当元件存在中心偏差时成像于  $A''$ ,  $A$  在  $O_1O_1'$  的投影为  $A_1$ ,  $A''$  在  $O_1O_1'$  的投影为  $A'_1$ 。  $A'A''$  就是存在中心偏差时  $A$  的像点的漂移量, 设其为  $P$ , 符号在  $A''$  位于  $OO'$  之上为正, 位于  $OO'$  之下为负。设该元件对物点  $A$  的垂轴放大率为  $\beta$ , 则:

$$A_1'A'' = \beta \cdot AA_1 = \beta \cdot (-\delta) = -\delta\beta \quad (1)$$

$$P = A'A'' = A'A'_1 + A'_1A'' = \delta + (-\delta\beta) = \delta(1-\beta) \quad (2)$$

对轴外物点  $B$ , 经存在中心偏差的光学元件成像于  $B'$ 。  $B$  点在  $OO'$  的投影为  $B_0$ , 在  $O_1O_1'$  的投影为  $B_1$ 。  $B'$  点在  $OO'$  的投影为  $B'_0$ , 在  $O_1O_1'$  的投影为  $B'_1$ 。见图 2。

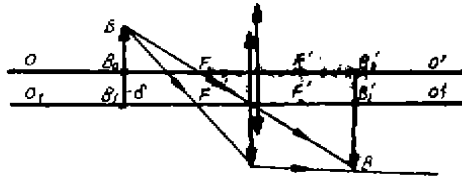


图 2

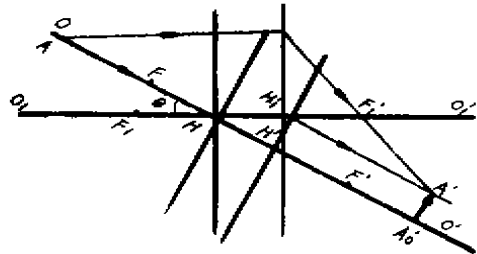


图 3

如图 2 所示, 设物  $B_0B$  的高度为  $y$ , 光学元件对  $B$  点的垂轴放大率为  $\beta$ , 则:

$$B_1B = B_1B_0 + B_0B = -\delta + y \quad (3)$$

$$B_1'B' = \beta \times B_1B = \beta(-\delta + y) \quad (4)$$

$$B_0'B' = B_0'B_1' + B_1'B' = \delta + \beta(-\delta + y) = y\beta + (1-\beta)\delta \quad (5)$$

物点  $B$  经过无中心偏差光学元件成像像高为:

$$y' = y\beta \quad (6)$$

像点漂移量  $P$  为:

$$P = B_0'B' - y' = (1-\beta)\delta \quad (7)$$

由此可见, 光学元件的中心偏差对像点位置的影响是使其偏离了理想位置  $\delta(1-\beta)$  的量。

### 2. 仅存在倾斜的光学元件所引起的像点漂移

当光学元件相对于理想位置存在倾斜时, 也会带来像点漂移。设光学元件的主面间隔为  $d$ , 主点分为  $H, H'$ , 它的主面法线  $0_10_1'$  相对于理想光轴  $00'$  倾斜了角度  $\theta$ , 物点  $A$  通过该元件成像于  $A'$ ,  $A'$  在理想光轴上的投影为  $A_0'$ ,  $A'A_0'$  即为像点漂移量, 见图 3。

如图 3 所示, 沿理想光轴  $00'$  入射的光线  $AH$  过物方主点  $H$ , 由理想光学原理可知, 出射光线过像方主点  $H'$ , 并且  $H'A'$  与  $AH$  平行, 所以像点漂移量为:

$$P = A'A_0' = d \sin \theta \quad (8)$$

为与理想光学规定的符号一致, 规定倾角  $\theta$  相对于理想位置顺时针旋转为负, 逆时针旋转为正。

### 3. 同时存在倾斜与中心偏差的光学元件所引起的像点漂移

实际光学系统中, 光学元件的倾斜和中心偏差往往同时存在, 像点漂移则为这两者共同作用的结果。当光学元件的倾斜和中心偏差都存在时, 可以认为该元件是相对于理想光轴偏移  $\delta$ , 然后再旋转角度  $\theta$ , 见图 4。

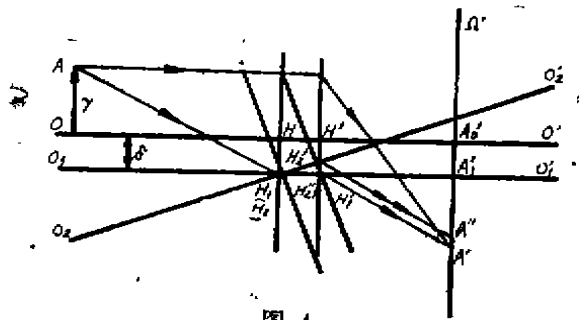


图 4

如图 4 所示, 物点  $A$ , 设其物高为  $y$ , 经仅存在中心偏差  $\delta$  的元件成像于  $A'$ 。此时实际光轴为  $0_10_1'$ ,  $0_10_1'$  与理想光轴  $00'$  平行, 由于  $A$  点到元件的物距不变,  $A'$  仍位于  $A$  通过无中心偏差元件成像的理想像面  $\Omega'$  上。设该平面与  $0_10_1'$  的交点为  $A_1'$ , 与  $00'$  的交点为  $A_0'$ 。此时物方主点为  $H_1$ , 像方主点为  $H_1'$ 。

当此元件绕  $H_1$  又旋转了一个角度  $\theta$  后, 设此时物方主点为  $H_2$ , 像方主点为  $H_2'$ 。  $H_2$  与  $H_1$  重合,  $H_2'$  在  $0_10_1'$  上的投影为  $H_{21}'$ 。  $A$  在理想像面上的像为  $A''$ 。由理想光学的原理可知,  $H_1'A'$  平行于  $AH_1$ ,  $H_2'A''$  也平行于  $AH_1$ , 所以  $H_1'A'$  平行于  $H_2'A''$ , 则有:

$$\overrightarrow{H_{21}' H_2'} = \overrightarrow{A' A''} = d \sin \theta \quad (9)$$

由图中可见:

$$\overrightarrow{A_0' A''} = \overrightarrow{A_0' A'} - \overrightarrow{A'' A'} = \overrightarrow{A_0' A'} + \overrightarrow{A' A''} \quad (10)$$

由公式(5)知:  $\overrightarrow{A_0' A'} = yB + (1-\beta)\delta$

$$\overrightarrow{A_0' A''} = yB + (1-\beta)\delta + d \sin \theta \quad (11)$$

A点经光学元件成像的理想像高  $y' = y\beta$ , 像点漂移量  $P$  为:

$$P = \overrightarrow{A_0' A''} - y' = (1-\beta)\delta + d \sin \theta \quad (12)$$

综上所述, 单个组元像点漂移量为由中心偏差引起的像点漂移量与元件倾斜引起的像点漂移量之和。

#### 4. 多个组元像点漂移量的计算

一个变焦距系统, 由多个光学组元组成。设系统存在  $n$  个组元, 它们的垂轴放大率分别为  $\beta_1, \dots, \beta_i, \dots, \beta_n$ , 光学系统如图3所示。

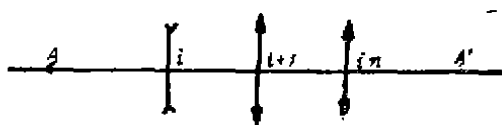


图5

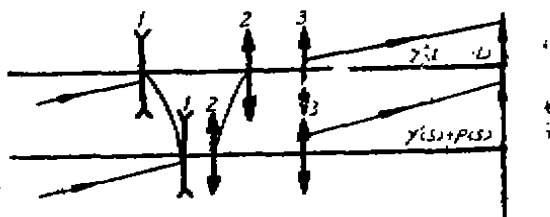


图6 1.变倍组 2.补偿组 3.后固定组

第  $i$  个组元在像面上的像点漂移量  $P_i$  为:

$$P_i = \delta_i (1 - \beta_i) \beta_{i+1} \dots \beta_n + d_i \sin \theta_i \beta_{i+1} \dots \beta_n \quad (13)$$

整个系统总的像点漂移量应该等于各组元的像点漂移量之和:

$$P_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (14)$$

### 三、关于像点漂移量的校正

#### 1. 利用选择参考物点的方法校正像点漂移量

变焦距系统  $\beta_i$  的变化依赖于变焦过程<sup>[2][3]</sup>, 所以像点漂移量  $P$  也依赖于变焦过程, 当变焦距系统从短焦位置  $S$  变到长焦位置  $L$  时, 物高为  $y$  的像点理想像高由  $y'(S)$  变到  $y'(L)$ , 像点漂移量由  $P(S)$  变到  $P(L)$ , 如图6所示。

由图6可见, 变焦距系统由短焦位置变至长焦位置, 像点的移动量为:

$$\begin{aligned} q'(L) &= y'(L) + P(L) - [y'(S) + P(S)] \\ &= y'(L) - y'(S) + P(L) - P(S) \end{aligned} \quad (15)$$

设短焦位置系统的总垂轴放大率为  $\beta(S)$ , 长焦位置系统的总垂轴放大率为  $\beta(L)$ , 则

$$\begin{aligned} y'(L) &= y\beta(L), \quad y'(S) = y\beta(S) \\ q'(L) &= y[\beta(L) - \beta(S)] + P(L) - P(S) \end{aligned} \quad (16)$$

由(16)式可见, 我们可以选择一个合适的参考物点  $\bar{y}$ , 使  $q'(L) = 0$ , 即相对于短焦端像点长焦端像点没有移动。这个参考物点  $\bar{y}$  为:

$$\bar{y} = \frac{P(S) - P(L)}{\beta(L) - \beta(S)} \quad (17)$$

公式 (16) 中,  $y[\beta(L) - \beta(S)]$  是由倍率变化引起的像移量,  $P(L) - P(S)$  是由像点漂移引起的像移量。 $q'(L) = 0$  意味着物点  $\bar{y}$  的像在不同的焦距时准确地位于相同位置, 也就是说由倍率变化引起的像移量的贡献与由像点漂移引起的像移量的贡献大小相等, 符号相反, 因此刚好正负相消。

对于任意的变焦位置  $x$ , 相对短焦位置  $S$  的残余像移量为:

$$q'(x) = \bar{y}[\beta(x) - \beta(A)] + P'(x) - P'(A) \quad (18)$$

由 (18) 式可见, 只有当  $P(x)$  与  $\beta(x)$  都是线性函数时, 对于所有的变焦位置  $q'(x)$  皆为 0, 但这是不可能的, 其原因在于:

$$P(x) = \sum_{i=1}^N \{ \delta_i [1 - \beta_i(x)] \beta_{i+1}(x) \cdots \beta_N(x) \} + \sum_{i=1}^N d_i \sin \theta_i \beta_{i+1}(x) \cdots \beta_N(x)$$

$$\beta(x) = \beta_1(x) \beta_2(x) \cdots \beta_N(x) \quad (19)$$

显然,  $P(x)$  和  $\beta(x)$  都不是线性函数, 但由于选定了合适的参考点, 倍率变化引起的像移量与像点漂移引起的像移量可以很好地补偿, 所以残余像移量  $q'(x)$  比像点漂移量要小得多, 这由第四部分的例子可以明显地看出。

2. 采用专门的机械结构改变组元偏心量  $\delta_i$  校正像点漂移  
由公式 (14) 可见:

$$P_{\Delta} = \sum_{i=1}^N \{ \delta_i [1 - \beta_i(x) + d_i \sin \theta_i] \cdot \beta_{i+1}(x) \cdots \beta_N(x) \} \quad (20)$$

由此式可见, 如果对于每一个变焦位置,  $\delta_i [1 - \beta_i(x) + d_i \sin \theta_i] = 0$ , 则  $P_{\Delta} = 0$ 。所以, 相对于每个  $\theta_i$  的值:

$$\delta_i = \frac{-d_i}{1 - \beta_i(x)} \cdot \sin \theta_i \quad (21)$$

依据这个公式提供的条件, 我们可以采用一个合适的偏心量  $\delta_i$ , 使变焦距系统在变焦过程中像点漂移得到良好的控制。

#### 四、两个实例

在实际工作中, 像点漂移量可以在装校过程中测得, 在测得长焦端与短焦端的像点漂移量的值以后, 参考点的位置就确定了。在变焦距系统的设计工作以前, 我们可以用计算机模拟变焦过程来计算像点漂移量以及选定参考物点后残余像移量的大小。以下两个例子就是使用计算机模拟计算的结果, 为讨论问题方便, 令各组元主面间隔  $d_i = 0$ , 中心偏差  $\delta_i$  取规范化值 1。

说明: 例子中  $F(L)$  为长焦端焦距,  $F(S)$  为短焦端焦距,  $F_2$  为变倍组焦距,  $F_3$  为补偿组焦距,  $m_4$  为后固定组放大倍率,  $M_2(L)$  为长焦端变倍组放大倍率,  $D'_{23}$  为长焦位置变倍组与补偿组间隔,  $F$  为几个不同变焦位置时的焦距值,  $P_1$  为变倍组像点漂移量,  $P_2$  为补偿组像点漂移量,  $P_3$  为后固定组像点漂移量;  $q_1'$  为变倍组的残余像漂移量,  $q_2'$  为补偿组的残余像漂移量,  $q_3'$  为后固定组的残余像漂移量; 根据公式 (17), 令  $y_1, y_2, y_3$  是相对于

变倍组、补偿组、后固定组的参考物高，在前固定组像面上的参考点物高为：

$$\bar{y} = \bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \quad (22)$$

1. 机械补偿法正组补偿10×变焦距系统

其数据与像点漂移、残余像漂移曲线如下：

FL= 1000 M4= 2	FS= 98.328 D23= 48.17355	F2=-133.91	F3= 133.91 M2L=-1
	P1	P2	P3
0	-3.076914	3.538458	-1
1	-2.735361	3.474342	-1
2	-2.320745	3.337161	-1
3	-1.857362	3.151215	-1
4	-1.335983	2.907273	-1
5	-.6956798	2.544407	-1
	a1'	a2'	a3'
0	-1.192093E-07	0	0
1	-.1346942	.1346941	0
2	-.196324	.1963236	0
3	-.2091883	.209188	0
4	-.1640565	.1640565	0
5	0	0	0
Y1= 1.716597	Y2=-.7165969	Y3= 0	

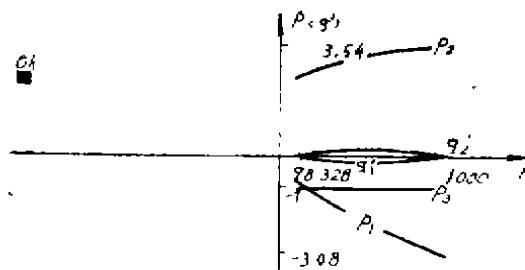


图7

由上述数据和曲线可见，选定参考点后残余像移量大大小于像点漂移量。而且，如果变倍组与补偿组的中心偏差大小相等，方向相同，则总的残余像移量 $\Sigma q_i$ 接近于零。

2. 机械补偿法负组补偿10×变焦距系统

其数据与像点漂移、残余像移曲线如下：

FL= 1000 M4=-1.5985	FS= 100 D23= 17.64208	F2=-90.13641	F3=-134.8733 M2L=-5.09568
	P1	P2	P3
0	-1.872189	-1.291366	2.5985
1	-1.690989	-1.190857	2.5985
2	-1.495665	-1.10447	2.5985
3	-1.271178	-1.047247	2.5985
4	-.9918942	-1.044821	2.5985
5	-.5905345	-1.164471	2.5985
	a1'	a2'	a3'
0	-5.960465E-08	0	0
1	-7.513053E-02	7.513046E-02	0
2	-.136138	.136138	0
3	-.1679818	.1679818	0
4	-.1450289	.1450288	0
5	0	0	0
Y1= .9099106	Y2= 9.008945E-02	Y3= 0	

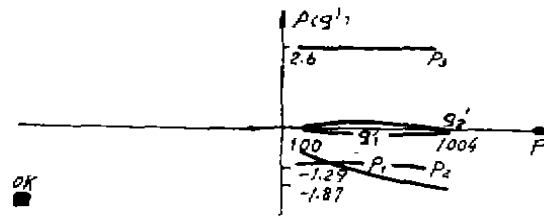


图 8

由上述数据与曲线可见, 选定参考点后对像点漂移做了良好的校正, 如果变倍组与补偿组中心偏差大小相等, 方向相同, 残余像移量接近于零。

## 五、结 论

跟踪测量电视变焦距系统中像点漂移可以采用两种光学方法加以校正。一种方法是选择合适的参考物点, 使其在像面上所成的像点做为电视零位, 也就是建立一个新的跟踪视轴, 这样在变焦过程中可以大大降低视轴漂移。另一种方法是采用专门的机械结构来改变组元偏心量  $\delta$ , 来实现校正像点漂移。这些方法可以在变焦距系统装调过程中实现。

本文所做的工作, 是在我的导师尤英奇研究员的悉心指导下完成的, 在此特表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Hannfried Zage, *Optical Engineering*, 25(1), 1986(Jan.), 192
- [2] 常群, 《光学设计文集》, 科学出版社, 北京, 1976年, 20
- [3] 张以漠, 《应用光学》下册, 机械工业出版社, 北京, 1982年, 148

## Rectifying the Transverse Image Displacement in Zoom System

Huang Wei

### Abstract

The effect of the center error and tilt of the components in zoom system upon transverse image displacement is analyzed in this paper, and a method is presented to reduce the transverse image displacement, by choosing the reference point and controlling the center error.