

跟踪测量变焦距光学偏心差公差的制定

黄 玮

摘要: 本文提出了以像点漂移允差为依据, 制定跟踪测量变焦距系统光学和相关的机械元件中心偏差公差的方法, 并把应用该方法制定的元件偏心差的结果与采用以中心彗差允差为依据所制定的元件偏心差的结果加以比较, 为跟踪测量变焦距系统元件中心偏差公差的制定提供了一些参考依据。

一、引 言

光学系统各光学表面中心偏差公差的制定通常都是按成像质量要求由中心彗差的允差提出的, 对于跟踪测量变焦距系统而言, 还需要考虑跟踪精度的要求。变焦距系统在变焦过程中像点偏离理想成像位置的横向移动, 称之为像点漂移。像点漂移是影响跟踪测量精度的重要因素, 它也是由于光学表面的偏心差及相关组元机械偏心与倾斜所引起的。我们发现, 当按照中心彗差允差给定偏心公差后, 仍存在较大的像点漂移量, 并不能满足较高跟踪测量精度的要求, 因此需根据跟踪精度的要求, 确定像点漂移的允差, 并以此为依据制定光学表面及相关组元机械偏心公差和组元倾斜公差。

二、由中心彗差的允差制定偏心差公差^[1]

光学系统的元件存在偏心时, 使该系统轴上像点存在非对称性像差。光学系统的初级波像差与光瞳坐标、物面坐标的关系为:

$$2w = \frac{1}{4} S_1 (y^2 + z^2) + S_{II} (y^2 + z^2) y \eta + S_{III} y^2 \eta^3 + \frac{1}{2} (S_{IV} + S_V) (y^2 + z^2) \eta^2 + S_V y \eta^3 \quad (1)$$

式中 y 、 z 和 η 分别为规化的光瞳坐标和物面坐标。光学系统由于坐标变化引起的波像差增量, 可由(1)式对 y 和 η 微分求得:

$$2\Delta w = S_2 (y^2 + z^2) y + S_3 y^3 \eta + \frac{1}{2} (S_3 + S_4) (y^2 + z^2) \eta + S_5 y \eta^2 + S_0 \eta^3 \quad (2)$$

式中: $S_2 = S_I \Delta y + S_{II} \Delta \eta$

$$S_3 = 2S_{II} \Delta y + 2S_{III} \Delta \eta$$

$$S_4 = 2S_{IV} \Delta \eta$$

$$S_5 = 3(S_{IV} + S_V) \Delta y + 3S_V \Delta \eta$$

$$S_0 = S_V \Delta y$$

(3)

波像差和几何像差的关系为:

$$nuTAy = \partial w / \partial y$$

$$nuTAz = \partial w / \partial z \tag{4}$$

所以，由坐标变化引起的几何像差增量可由对(1)式微分求得：

$$2nu\Delta TAy = S_2(3y^2 + z^2) + 3(S_3 + S_4)y\eta + S_5\eta^2$$

$$2nu\Delta TAz = 2S_2yz + (3S_3 + S_4)z\eta \tag{5}$$

由(5)式可见， $\eta = 0$ 时，仍存在 S_2 的影响，即视场中心出现彗差，称为中心彗差。

一般变焦距系统只考虑中心彗差的要求，如图1所示。

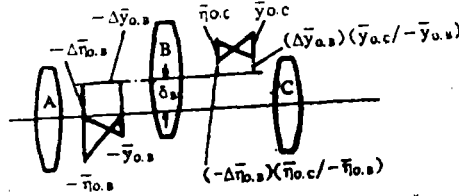


图1 B组元平移了 δ_s

设B组存在子午面内平移 δ_s ，则该组(或该表面)接受物面坐标 $(-\eta_{o,s})$ 和光瞳坐标 $(-y_{o,s})$ 发生变化，其增量为：

$$\overline{\Delta\eta_{o,s}} = -\delta_s$$

$$\overline{\Delta y_{o,s}} = -\delta_s \tag{6}$$

B组和其后C组归化坐标变动量：

$$\Delta y_s = \Delta y_s / \Delta y_{o,s} = -\delta_s / y_{o,s}$$

$$\Delta \eta_s = \Delta \eta_s / \Delta \eta_{o,s} = -\delta_s / \eta_{o,s}$$

$$\Delta y_c = \Delta y_c / y_{o,c} = -\delta_s / y_{o,s} + \delta_s / \eta_{o,c}$$

$$\Delta \eta_c = \Delta \eta_c / \eta_{o,c} = -\delta_s / \eta_{o,s} + \delta_s / \eta_{o,c} \tag{7}$$

将(7)式代入 S_2 的表示式(3)中，得：

$$S_2 = -\delta_s \left\{ \left(\sum_B S_1 / y_{o,s} + \sum_C S_1 / \eta_{o,s} \right) - \left(\sum_C S_1 / y_{o,c} + \sum_C S_1 / \eta_{o,c} \right) \right\} \tag{8}$$

式中 \sum_B 表示对B组和C组所有面像差系数求和， \sum_C 表示对C组所有面像差系数求和。若光

学系统由k个面组成，其中第i面偏心量为 δ_i ，按上述过程可得类似公式：

$$S_2 = -\delta_i \left\{ \left(\sum_1^k S_1 / y_{o,i} + \sum_1^k S_1 / \eta_{o,i} \right) - \left(\sum_{i+1}^k S_1 / y_{o,i+1} + \sum_{i+1}^k S_1 / \eta_{o,i+1} \right) \right\} \tag{9}$$

实际光学系统中，给定中心子午彗差允差由几何像差和波差关系得到：

$$\Delta KT' = \frac{3}{2} \frac{S_2}{n' u'} \tag{10}$$

按等概率分配原则，各面偏心公差：

$$\delta_i = -\frac{2}{3} \frac{n' u' \Delta KT'}{\sqrt{k}} / \left\{ \left(\frac{\sum_1^k S_1}{y_{o,i}} + \frac{\sum_1^k S_1}{\eta_{o,i}} \right) - \left(\frac{\sum_{i+1}^k S_1}{y_{o,i+1}} + \frac{\sum_{i+1}^k S_1}{\eta_{o,i+1}} \right) \right\} \tag{11}$$

按不等概率分配, 各面加权确定 δ_i , 只要相应的 $\Delta kT'_i$ 满足:

$$\left(\sum_{i=1}^k \Delta kT'_i \right)^2 \leq \Delta kT'_{允} \quad (12)$$

则认为中心彗差在允许范围内。

三、由像点漂移允差制定光学元件偏心差公差

光学系统存在偏心, 即光轴平移和倾斜, 都会引起像点漂移。由光轴平移引起的像点漂移如图 2 所示。

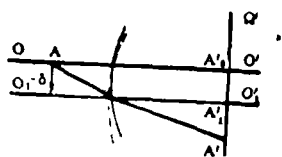


图 2 单一表面光轴平移引起的像点漂移

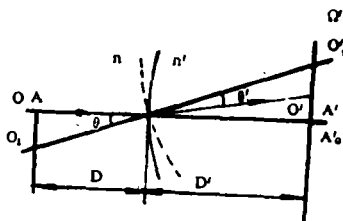


图 3 单一表面光轴倾斜引起的像点漂移

图中实线部分表示无偏差光学表面, 虚线部分表示光轴平移 δ 后的光学表面, OO' 为无偏差光学表面的光轴, O_1O_1' 为平移后的光轴。轴上物点 A , 经无偏差光学表面成像于像面 Ω' 上的 A_0' 处, 当存在光轴平移量 δ 时, 成像于 Ω' 上的 A_1' 处, OO' 与 Ω' 相交于 A_0' 处, O_1O_1' 与 Ω' 相交于 A_1' 处。由几何光学原理可知, 如果该面垂轴放大率为 m , 则:

$$\overline{A_1'A_0'} = -m\delta \quad (13)$$

由中心偏差引起的像点漂移量:

$$p = \overline{A_0'A'} = \overline{A_0'A_1'} + \overline{A_1'A'} = (1-m)\delta \quad (14)$$

为使像点漂移量的符号与几何光学所规定的一致, 令 δ 在 OO' 之上为正, OO' 之下为负。

各面由于倾斜带来的像点漂移如图 3 所示, 图中实线部分为无偏差光学表面, 虚线部分为光轴倾斜 θ 角后的光学表面。 OO' 为无偏差光学表面的光轴, O_1O_1' 为光轴倾斜后的光轴。轴上物点 A , 其物距为 l , 经无偏差光学表面成像于像面 Ω' 上的 A_0' , 像距为 l' , 当元件存在倾斜时, A 点成像于 A' , 光学表面两边介质折射率分别为 n 和 n' 。沿 OO' 入射的光线与 O_1O_1' 的夹角为 θ , 经元件表面折射后的折射角为 θ' , 由几何光学原理知:

$$\theta' = (n/n')\theta \quad (15)$$

像点漂移量 P 为:

$$P = \overline{A'A_0'} = l'(\theta - \theta') = l'\theta[(n' - n)/n'] \quad (16)$$

由几何光学原理知:

$$l' = nr l / [(n' - n)l + nr] \quad (17)$$

把(17)式代入(16)式, 得:

$$P = \left(1 - \frac{nr}{(n' - n)l + nr} \right) r\theta \quad (18)$$

该面垂轴放大率 m 为:

$$m = \frac{n'l'}{n'l} = \frac{n}{n'l} \cdot \frac{n'rl}{(n' - n)l + nr} = \frac{nr}{(n' - n)l + nr} \quad (19)$$

故(16)式可以改写为:

$$P = (1 - m)r\theta \quad (20)$$

由(20)式可见, 单一球面由倾斜引起的像点漂移可以看作光轴平移了 $\delta = r\theta$ 的量。所以单一球面引起像点漂移的讨论可简化为只考虑光轴平移。

由 k 个面组成的变焦距系统, 各面垂轴放大率分为 $m_1, m_2 \dots m_k$, 其中第 i 个面在系统像面上引起的像点漂移量为:

$$\overrightarrow{P}_i = (1 - m_i) m_{i+1} \dots m_k \overrightarrow{\delta}_i \quad (21)$$

对于各个面, $\overrightarrow{\delta}_i$ 的方向是随机的, 在像面上的总像点漂移量为:

$$\overrightarrow{P} = \sum_{i=1}^k \overrightarrow{P}_i = \sum_{i=1}^k (1 - m_i) m_{i+1} \dots m_k \overrightarrow{\delta}_i \quad (22)$$

对实际系统而言, 各面在不同焦距位置的垂轴放大率是已知的, 当限定了系统的像点漂移量后, 各面偏心差公差就可以等概率地分配下去^[2], 也就是说各面对总的像点漂移的影响相同。

$$P_i = P_{\Sigma} / \sqrt{n} \quad (23)$$

把(23)式与(21)式联立, 得:

$$\delta_i = P_{\Sigma} / [\sqrt{n} (1 - m_i) m_{i+1} \dots m_k] \quad (24)$$

这就是考虑像点漂移允差, 制定各面偏心差公差的等概率分配公式。

不等概率分配时, 各面加权确定 δ_i , 只要相应的 P_i 满足:

$$\sum_{i=1}^k P_i^2 \leq P_{\Sigma}^2 \quad (25)$$

则认为系统的像点漂移在允许范围内。

四、由像点漂移允差制定各组元相关的机械公差

由文献^[3]可知, 变焦距系统即使各光学表面没有偏心差, 各组元机械加工或安装误差引起的倾斜和光轴平移仍会产生像点漂移。如果变焦距系统由 N 组组成, 其中第 i 组在像面上引起的像点漂移量^[3]:

$$\overrightarrow{P}_i = \overrightarrow{P}_{t,i} + \overrightarrow{P}_{p,i} \quad (26)$$

其中: $\overrightarrow{P}_{t,i} = (1 - m_i) m_{i+1} \dots m_N \overrightarrow{\delta}_i$

$$|\overrightarrow{P}_{t,i}| = d_i \sin \theta_i m_{i+1} \dots m_N \quad (27)$$

$P_{t,i}$ 是由于光轴倾斜引起的像点漂移量, 当倾角很小时, θ_i 以弧度表示, 则:

$$|\overrightarrow{P}_{t,i}| = d_i \theta_i m_{i+1} \dots m_N \quad (28)$$

$P_{p,i}$ 是由于光轴平移引起的像点漂移量。

当系统总像点漂移允许值为 P_{Σ} 时, 考虑最坏的情况, 光轴平移与光轴倾斜带来的像点漂移同方向。考虑组元运动过程中倾斜与平移的不同影响, 可以把 P_{Σ} 乘以一个因子 $V (V < 1)$ 分配给光轴平移引起的像点漂移量, 则分配给光轴倾斜带来的像点漂移量的因子为 $1 - V$ 。则, 光轴平移公差等概率分配公式为:

$$\delta_i = V \cdot P_{\Sigma} / [\sqrt{N} (1 - m_i) m_{i+1} \cdots m_N] \quad (29)$$

光轴倾斜公差等概率分配公式:

$$\theta_i = (1 - V) P_{\Sigma} / (\sqrt{N} d_i \theta_i m_{i+1} \cdots m_N) \quad (30)$$

系统结构给定后, 各组元主面间隔 d_i 可以求出, 各组元机械镜筒中心允许偏离理想光轴的公差由 (29) 式确定, 机械镜筒及其导轨允许倾斜的角度由 (30) 式确定。

五、变焦距系统中心偏差公差分配程序设计思想及结果分析

对于确定结构的变焦距系统, 各面像差系数垂轴放大率、光瞳坐标和物面坐标以及各组元主面间隔、垂轴放大率, 可以通过计算两条近轴辅助光线 (近轴光线 l 和主光线 l') 求得。应用公式 (9) 可以求得按中心彗差允差分配的各面中心偏差公差, 应用公式 (24) 可以求得按像点漂移允差分配的各面中心偏差公差, 应用公式 (29) 和 (30) 可以求得各组元光轴平移和倾斜公差。按照上述思路编制的程序计算了一个变倍比为15倍的电视跟踪变焦距系统中中心偏差公差, 结果如表 1 (系统结构如图 4 所示)。表 1 中 T 是由中心彗差允差分配的各面中心偏差公差, T_1 是由像点漂移允差分配的各面中心偏差公差。 TT 是按像点漂移允差分配的各组元光轴平移公差, DU 是按像点漂移允差分配的各组元倾斜角度公差, KT 是按像点漂移要求分配的中心偏差公差所产生的中心彗差。在此计算中, 中心彗差允差和像点漂移允差都取为 0.03mm 。

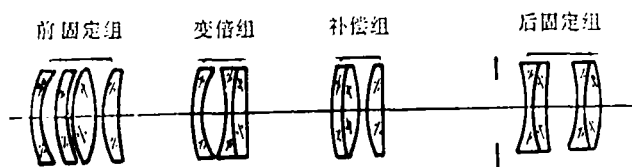


图 4 15倍变焦距镜头结构图

上述结果表明, 在允差相同情况下, 按像点漂移要求计算出的中心偏差公差比按中心彗差要求计算出的中心偏差公差要严格得多。当系统满足像点漂移要求时, 中心彗差要求是可以满足的。由像点漂移要求制定的光学元件与机械组元的偏心差公差都偏严, 加工较难实现。对此我们可以采用参考文献^[3]中选定参考点校正像点漂移的方法, 适当放宽光学与机械元件的偏心差公差, 使残余像移量满足像点漂移的要求, 同时在该公差条件下保证中心彗差也满足要求。这样就可以既满足像质要求, 又满足跟踪精度要求。

本文所做的工作, 是尤英奇研究员的指导下完成的, 在此谨表示衷心的感谢。

表 1 15倍变焦距中心偏差公差分配结果

$U = 0$		$H = 55$	$UP = .495$
$V = 0.5$		$KT = 0.03$	
	T		T1
1	-2.819771 E - 02		1.913514 E - 03
2	1.658925 E - 02		-1.641145 E - 03
3	2.973966		7.813293 E - 03
4	7.764036 E - 03		-1.61145 E - 03
5	-8.803509 E - 03		2.018431 E - 03
6	-.3573663		4.554863 E - 03
7	-2.210172 E - 02		1.595941 E - 03
8	.2270086		-8.635711 E - 03
9	-.7990397		3.255883 E - 02
10	3.689465 E - 02		-1.461183 E - 03
11	.7288404		-2.035823 E - 03
12	-3.895351 E - 02		1.327155 E - 02
13	.5318052		-1.588699 E - 02
14	-.2721891		1.007243 E - 02
15	6.681436 E - 02		-1.674818 E - 02
16	-.3260567		2.248309 E - 03
17	-.1195018		2.22596 E - 03
18	1.92065		-1.702032 E - 02
19	0		0
20	.1032255		-5.484071 E - 03
21	-.4954054		.1242675
22	.406633		-5.052643 E - 03
23	.346561		-8.636489 E - 03
24	2013564		-2.650243 E - 02
25	-5.414893 E - 02		3.294322 E - 03
	TT		DU(单位“1”)
1	1.93359 E - 03		.8356996
2	-1.103794 E - 03		-1.655346
3	1.428831 E - 03		2.41552
4	-5.626009 E - 03		-.7010563

KT = 3.743613 E - 03

参 考 文 献

- [1] 王之江,《光学设计理论基础》,科学出版社,1985年,310~314
- [2] 毛英泰,《误差理论与精度分析》,国防工业出版社,1982.6
- [3] 黄玮,光学机械,1990年,4期,9~14

Determination of the Center Error Tolerance of the Tracing and Measuring Zoom System

Huang Wei

Abstract

This paper presents a method to determine the center error tolerance of the component in zoom system according to the transverse image displacement tolerance, by comparing the result from this method with that from the center-coma tolerance, in order to provide some reference basis to determine the center error tolerance of the component in tracing and measuring zoom system.