

光学系统偏心公差计算方法

林 大 键

(中国科学院光电技术研究所)

提 要

本文讨论偏心光学系统的基本光学特性、初级像差理论以及偏心公差计算方法。并对两种高质量光学系统偏心公差的计算作实例说明。

一、前 言

关于光学零件偏心公差计算方法,苏联光学工作者 Г. Г. Слюсарев^[1]曾经提出用子午彗差公式来计算。但他只考虑到本征像差,而并没有考虑到衍生像差的变化,即没有计及光学系统中,某一面的球心偏离光轴,引起其后透镜组的光线坐标变化而造成的衍生像差。

我国长春光学精密机械研究所光学设计组,曾在王之江同志领导下,对光学系统偏心公差计算问题作了理论工作^[2]。提出用光阑坐标和物面坐标变化的概念来计算各种初级波差变化,包括本征和衍生像差变化,以求得光学系统各面球心偏离光轴的允许量。

随着光学设计水平的提高以及各种高质量光学系统日益广泛的应用,在如何保证光学系统的质量问题上,我们进一步做了实用化工作。

本文作者试图系统地总结一下,我们多年来试用的偏心公差算法。

二、偏心定义及其几何光学特性

偏心系指光学系统中的各光学表面曲率中心(球心)对指定的参考几何轴线(定位轴)的垂直偏离量。

对轴对称的光学系统而言,参考定位轴是指各个球心连线的光轴。对光学零件而言,参考轴是该零件外圆的轴线。因此,在光学零件图纸上,应指出决定参考轴的基面以及零件的各个光学表面曲率中心的允许偏离量。也即,对于单透镜,应指出其两个球面的曲率中心所允许的偏离量。对于双胶合透镜,应指明以哪个外圆做基面以及三个球面的球心允许偏离量。在装校和检测时,应指明参考轴线(定位轴),并使被测光学系统绕定位轴转动,以测量和调整各面的球心对定位轴的垂直偏离量。

光学系统中,某一光学表面的曲率中心对光轴偏离,无非会出现两种可能的情况:一种为平移,即球面与光轴相交的顶点和其球心同时平移开光轴;另一种为球心绕球面顶点 A 转过一个小角度 α_0 , 如图 1 所示。

图中表示,零件第 2 面球心 O_2 绕着顶点 A 转过 α_2 角,则引起该面球心垂直偏离光轴

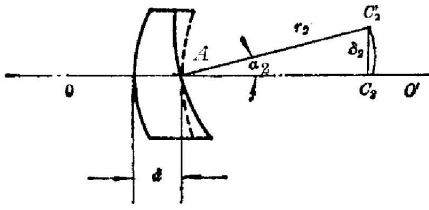


图1 光学零件第2表面偏心 δ_2
Fig. 1 Curvature center of second surface is deviated an amount δ_2 from the optical axis by turning an angle α_2

OO' 的量为

$$\delta_2 = r_2 \sin \alpha_2 \quad (1)$$

若把该情况看作为球面顶点 A 和球心 C_2 同时平移开光轴的量 δ_2 , 则转动与平移二者之间的差别, 只在于该表面顶点沿平行光轴方向平移一个量 Δd 。

$$-\Delta d = r_2(1 - \cos \alpha_2) = 2r_2 \sin^2 \frac{\alpha_2}{2} \quad (2)$$

由于偏心差 δ 是小量, 偏角 α 也是小量, 故 Δd 是二级小量。透镜厚度公差一般要比偏心公差宽一个数量级。所以一般情况下, 我们仅讨论平移就可以了。若光学系统中, 某一透镜厚度公差的要求特别严格, 则我

们可以把转动视作平移, 并辅以考虑其厚度变化对光学系统像质影响。

在一个光学系统中, 如图2表示, 某一组元 B (或某一光学表面) 平移开光轴量为 δ_B , 则使得该组 (或该光学表面) 所接受的物面坐标 $(-\eta_{0,B})$ 和光瞳坐标 $(-y_{0,B})$ 发生变化。其增量分别为

$$\Delta \bar{\eta}_{0,B} = -\delta_B, \quad \Delta \bar{y}_{0,B} = -\delta_B \quad (3)$$

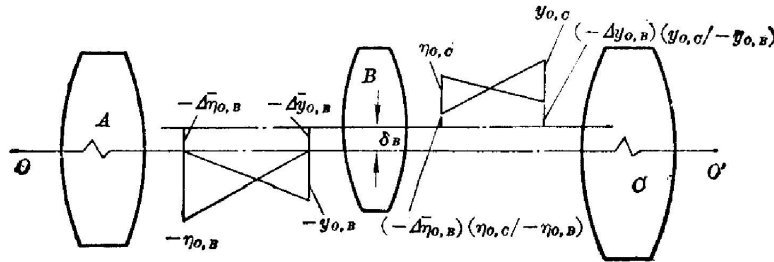


图2 光学系统中, B 组平移开光轴量为 δ_B
Fig. 2 The group B in an optical system is deviated parallelly an amount δ_B from the optical axis

同时, 由于 B 组的平移也带来其后的 C 组物面坐标 $(\eta_{0,c})$ 和光瞳坐标 $(y_{0,c})$ 发生变化。

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\eta}_{0,c} &= -\Delta \bar{\eta}_{0,B} \left(\frac{\eta_{0,c}}{-\eta_{0,B}} \right) + \delta_B = -\delta_B \left(\frac{\eta_{0,c}}{\eta_{0,B}} \right) + \delta_B, \\ \Delta \bar{y}_{0,c} &= -\Delta \bar{y}_{0,B} \left(\frac{y_{0,c}}{-y_{0,B}} \right) + \delta_B = -\delta_B \left(\frac{y_{0,c}}{+y_{0,B}} \right) + \delta_B, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\eta_{0,c}/\eta_{0,B} = m_B$ 为 B 组的垂轴放大率。于是造成光学系统最后像面上像点中心垂轴位移^[3]

$$\Delta \bar{\eta}'_c = \delta_B(1 - m_B)m_C \quad (5)$$

若是光学系统绕光轴 OO' 旋转, 则可以看到原轴上物点绕视场中心转动, 旋转半径为 $\Delta \bar{\eta}'_c$ 量。

三、偏心对光学系统像质的影响

光学系统存在偏心时, 使该系统出现非对称性像差。对轴上像点言, 有中心彗差和中心

垂轴色差,使得像点的衍射环失去对称性,而且带有非对称性颜色。在偏心较严重情况下,还会在视场中心看到两条分开的焦线,称为中心像散。同时,轴外像点出现像散和非对称性的畸变(称为切向畸变)。前者主要用于考虑对于望远物镜、显微镜物镜和微缩镜头等影响。后者主要用于考虑对广角测量镜头,如航摄镜头、导弹相机镜头等像质影响。

用大型电子计算机来逐一计算光学系统中各个面不同偏心情况下的光线方法,可以得到偏心对像差的影响。但在一般情况下,由于偏心是小量,只考虑由于坐标(物面坐标和光瞳坐标)的变化引起初级像差变化就可以了。除了由大像差相配合而构成高质量光学系统外,运用初级像差理论来讨论偏心对像质的定量影响,并求得偏心公差,是可行且方便的。

光学系统的初级波差与光瞳坐标,物面坐标的关系式可表示为

$$2W = \frac{1}{4} S_I (y^2 + z^2)^2 + S_{II} (y^2 + z^2) y \eta + S_{III} y^2 \eta^2 + \frac{1}{2} (S_{III} + S_{IV}) (y^2 + z^2) \eta^2 + S_V y \eta^3, \quad (6)$$

式中, $y = \frac{\bar{y}}{y_0}$, $z = \frac{\bar{z}}{z_0}$ 和 $\eta = \frac{\bar{\eta}}{\eta_0}$ 表示为规一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差增量,可由上式对 y 和 η 微分而得^[2],

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

式中,

$$\begin{aligned} S_2 &= S_I \Delta y + S_{II} \Delta \eta, \\ S_3 &= 2S_{II} \Delta y + 2S_{III} \Delta \eta, \\ S_4 &= 2S_{IV} \Delta \eta, \\ S_5 &= (3S_{III} + S_{IV}) \Delta y + 3S_V \Delta \eta, \\ S_0 &= S_V \Delta y. \end{aligned} \quad (7)$$

坐标变化引起的色波差增量,可用同样方法对色波差表示式

$$\delta W_\lambda = \frac{1}{2} C_I (y^2 + z^2) + C_{II} y \eta, \quad (8)$$

微分而得

$$\Delta \delta W_\lambda = C_2 y + C_0 \eta, \quad (9)$$

式中,

$$\begin{aligned} C_2 &= C_I \Delta y + C_{II} \Delta \eta, \\ C_0 &= C_{II} \Delta y. \end{aligned}$$

因为波差与几何像差关系式为

$$\begin{cases} nuT A_y = \frac{\partial W}{\partial y}, \\ nuT A_z = \frac{\partial W}{\partial z}, \\ nu^2 L A_y = 2 \frac{\partial W}{\partial y^2}, \\ nu^2 L A_z = 2 \frac{\partial W}{\partial z^2}. \end{cases} \quad (10)$$

所以,可对上式(6)和(9)进行偏微分,求得坐标变化引起的几何像差的增量,如下式。

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

$$2n\mu \Delta T A_z = 2S_2 yz + (S_3 + S_4) z\eta, \quad (11)$$

$$n\mu \Delta T A_{y, \lambda} = C_2. \quad (12)$$

从上式的分析可知, 在 $\eta=0$ 时, 也存在 C_2 和 S_2 的影响, 即在视场中心出现像差, 分别称为中心垂轴色差和中心彗差。 S_3 和 S_4 与像高成正比, 它形成与高斯像面成一定夹角的像散焦平面。 S_5 称为切向畸变, 它使方形物体的像成非对称性变形。

又如图 2 所示的情况, 由于 B 组在子午面内平移 δ_B , 则从公式(3)和(4)可求得 B 组和其后 C 组的规一化坐标变动量为

$$\begin{aligned} \Delta y_B &= \frac{\Delta \bar{y}_B}{y_{0,B}} = -\frac{\delta_B}{y_{0,B}}, \\ \Delta \eta_B &= \frac{\Delta \bar{\eta}_B}{\eta_{0,B}} = -\frac{\delta_B}{\eta_{0,B}}, \\ \Delta y_C &= \frac{\Delta \bar{y}_C}{y_{0,C}} = -\frac{\delta_B}{y_{0,B}} + \frac{\delta_B}{y_{0,C}}, \\ \Delta \eta_C &= \frac{\Delta \bar{\eta}_C}{\eta_{0,C}} = -\frac{\delta_B}{\eta_{0,B}} + \frac{\delta_B}{\eta_{0,C}}. \end{aligned} \quad (13)$$

将上式代入公式(10)和(7)得

$$\begin{aligned} C_2 &= (-\delta_B) \left\{ \left(\frac{\sum_B C_I}{y_{0,B}} + \frac{\sum_B C_{II}}{\eta_{0,B}} \right) \right\} \\ &\quad + (-\delta_B) \left\{ \left(\frac{\sum_C C_I}{y_{0,B}} - \frac{\sum_C C_{II}}{y_{0,C}} \right) + \left(\frac{\sum_C C_{II}}{\eta_{0,B}} - \frac{\sum_C C_{III}}{\eta_{0,C}} \right) \right\} \\ &= -\delta_B \left\{ \left(\frac{\sum_B C_I}{y_{0,B}} + \frac{\sum_B C_{II}}{\eta_{0,B}} \right) - \left(\frac{\sum_C C_I}{y_{0,C}} + \frac{\sum_C C_{II}}{\eta_{0,C}} \right) \right\}, \\ S_2 &= -\delta_B \left\{ \left(\frac{\sum_B S_I}{y_{0,B}} + \frac{\sum_B S_{II}}{\eta_{0,B}} \right) - \left(\frac{\sum_C S_I}{y_{0,C}} + \frac{\sum_C S_{II}}{\eta_{0,C}} \right) \right\}, \\ S_3 &= -2\delta_B \left\{ \left(\frac{\sum_B S_{II}}{y_{0,B}} + \frac{\sum_B S_{III}}{\eta_{0,B}} \right) - \left(\frac{\sum_C S_{II}}{y_{0,C}} + \frac{\sum_C S_{III}}{\eta_{0,C}} \right) \right\}, \\ S_4 &= -2\delta_B \left\{ \left(\frac{\sum_B S_{IV}}{\eta_{0,B}} - \frac{\sum_C S_{IV}}{\eta_{0,C}} \right) \right\}, \\ S_5 &= -\delta_B \left\{ \left(\frac{\sum_B (3S_{III} + S_{IV})}{y_{0,B}} + \frac{\sum_B 3S_V}{\eta_{0,B}} \right) - \left(\frac{\sum_C (3S_{III} + S_{IV})}{y_{0,C}} + \frac{\sum_C 3S_V}{\eta_{0,C}} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中, \sum_B 和 \sum_C 分别表示对 B 组和 C 组所有面的像差系数求和, \sum_B 表示对 B 组和 C 组所有面的像差系数求和, 即从 B 组的第一面到 C 组的最后一面的像差系数求和。上式的物理意义可以理解为光学系统中某组(图 2 中所示为 B 组)平移开光轴 δ_B 量, 也可以考虑为该组与其后所有的组都平移开光轴 δ_B 量, 然后再把其后所有的组再移回到光轴, 来计算平移对像差系数的影响。

若光学系统是由 K 个面所组成的, 其中第 m 面的球心偏离量为 δ_m , 则按上述过程可以得到类似公式, 表示如下:

$$\begin{aligned}
C_2 &= -\delta_m \left\{ \left(\frac{\sum^K C_I}{y_{0,m}} + \frac{\sum^K C_{II}}{\eta_{0,m}} \right) - \left(\frac{\sum^K C_I}{y_{0,m+1}} + \frac{\sum^K C_{II}}{\eta_{0,m+1}} \right) \right\}, \\
S_2 &= -\delta_m \left\{ \left(\frac{\sum^K S_I}{y_{0,m}} + \frac{\sum^K S_{II}}{\eta_{0,m}} \right) - \left(\frac{\sum^K S_I}{y_{0,m+1}} + \frac{\sum^K S_{II}}{\eta_{0,m+1}} \right) \right\}, \\
S_3 &= -2\delta_m \left\{ \left(\frac{\sum^K S_{II}}{y_{0,m}} + \frac{\sum^K S_{III}}{\eta_{0,m}} \right) - \left(\frac{\sum^K S_{II}}{y_{0,m+1}} + \frac{\sum^K S_{III}}{\eta_{0,m+1}} \right) \right\}, \\
S_4 &= -2\delta_m \left\{ \left(\frac{\sum^K S_{IV}}{\eta_{0,m}} - \frac{\sum^K S_{IV}}{\eta_{0,m+1}} \right) \right\}, \\
S_5 &= -\delta_m \left\{ \left(\frac{\sum^K (3S_{III} + S_{IV})}{y_{0,m}} + \frac{\sum^K 3S_V}{\eta_{0,m}} \right) - \left(\frac{\sum^K (3S_{III} + S_{IV})}{y_{0,m+1}} + \frac{\sum^K 3S_V}{\eta_{0,m+1}} \right) \right\}. \quad (15)
\end{aligned}$$

对于平面的情况,就不能用球心对光轴偏离量来讨论,而只有平面对光轴的倾斜问题。

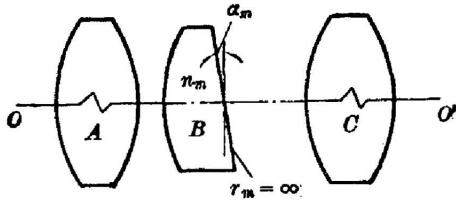


图3 光学系统中第 m 面为平面,它不垂直于光轴

Fig. 3 The m th surface in an optical system is a plane which is not perpendicular to the optical axis

由于规一化坐标有如下比例关系,

$$\begin{aligned}
\bar{y} &= \frac{\bar{y}}{y_0} = \frac{\bar{u}}{u_0}, \\
\bar{\eta} &= \frac{\bar{\eta}}{\eta_0} = \frac{\bar{u}_p}{u_{p0}}, \quad (16)
\end{aligned}$$

则可从两条辅助近轴光线(l 和 l_p)的角度增量 $\Delta\bar{u}$ 和 $\Delta\bar{u}_p$,来求得规一化坐标的增量 Δy 和 $\Delta\eta$ 。若光学系统中,第 m 面为平面,则它与光轴不垂直度为 α_m 角,如图3所示。

则由于平面倾斜使得规一化坐标增量为

$$\Delta y_m = \frac{\Delta\bar{u}_m}{u_{0,m}} = \frac{\alpha_m}{u_{0,m}}, \quad \Delta\eta_m = \frac{\Delta\bar{u}_{pm}}{u_{p0,m}} = \frac{\alpha_m}{u_{p0,m}}. \quad (17)$$

第 m 面之后的规一化坐标增量为

$$\begin{aligned}
\Delta y_{m+1} &= \frac{\Delta\bar{u}_{m+1}}{u_{0,m+1}} = \frac{\Delta\bar{u}_m \left(\frac{n_m}{n_{m+1}} - 1 \right)}{u_{0,m} \left(\frac{n_m}{n_{m+1}} \right)} = \frac{\alpha_m}{u_{0,m}} \left(1 - \frac{n_{m+1}}{n_m} \right), \\
\Delta\eta_{m+1} &= \frac{\Delta\bar{u}_{p,m+1}}{u_{p0,m+1}} = \frac{\alpha_m}{u_{p0,m}} \left(1 - \frac{n_{m+1}}{n_m} \right). \quad (18)
\end{aligned}$$

把上述二式(17)和(18)代入规一化坐标增量对波差系数影响的关系式(7)和(9),经过整理得到如下与(15)式相似的代表式。

$$\begin{aligned}
C_2 &= \alpha_m \left\{ \left(\frac{\sum^K C_I}{u_{0,m}} + \frac{\sum^K C_{II}}{u_{p0,m}} \right) - \left(\frac{\sum^K C_I}{u_{0,m+1}} + \frac{\sum^K C_{II}}{u_{p0,m+1}} \right) \right\}, \\
S_2 &= \alpha_m \left\{ \left(\frac{\sum^K S_I}{u_{0,m}} + \frac{\sum^K S_{II}}{u_{p0,m}} \right) - \left(\frac{\sum^K S_I}{u_{0,m+1}} + \frac{\sum^K S_{II}}{u_{p0,m+1}} \right) \right\},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_3 &= 2\alpha_m \left\{ \left(\frac{\sum_m^{\kappa} S_{II}}{u_{0,m}} + \frac{\sum_m^{\kappa} S_{III}}{u_{p0,m}} \right) - \left(\frac{\sum_{m+1}^{\kappa} S_{II}}{u_{0,m+1}} + \frac{\sum_{m+1}^{\kappa} S_{III}}{u_{p0,m+1}} \right) \right\}, \\
S_4 &= 2\alpha_m (n_m - n_{m+1}) \frac{\sum_{m+1}^{\kappa} S_{IV}}{n_{m+1} \cdot u_{p0,m+1}}, \\
S_5 &= \alpha_m \left\{ \left(\frac{\sum_m^{\kappa} (3S_{III} + S_{IV})}{u_{0,m}} + \frac{\sum_m^{\kappa} 3S_V}{u_{p0,m}} \right) - \left(\frac{\sum_{m+1}^{\kappa} (3S_{III} + S_{IV})}{u_{0,m+1}} + \frac{\sum_{m+1}^{\kappa} 3S_V}{u_{p0,m+1}} \right) \right\}, \quad (19)
\end{aligned}$$

式中, $u_{0,m+1} = \frac{n_m}{n_{m+1}} u_{0,m}$, $u_{p0,m+1} = \frac{n_m}{n_{m+1}} u_{p0,m}$

上式的物理意义可以理解为光学系统中, 某 m 面为平面, 当它的倾斜角为 α_m 时, 可以认为该平面和其后的镜组绕其顶点旋转同一角度, 然后再把其后镜组绕该顶点旋转回到原位, 来计算该平面倾斜对像差变化的影响。从公式可知, 对于折射率差 $\Delta n_m = n_{m+1} - n_m$ 较小的平面, 如近等折射率的胶合面, 要比非胶合面对像差变化影响小得多。

实际光学系统中, 各组元或各个光学表面的初级像差系数, 以及光瞳坐标和物面坐标, 只要计算两条近轴辅助光线 (l 和 l_p) 就可以求得。如果给出偏心量 δ_m (或 α_m), 用上述公式 (15) (对平面情况, 用 (19) 式) 求得偏心引起像差系数变化值 C_2, S_2, S_3, S_4 和 S_5 , 再由 (11) 式和 (12) 式得到几何像差变化量, 即

$$\begin{aligned}
C. Tch' &= \frac{C_2}{n'u'}, \\
C. Coma_v &= \frac{3S_2}{2n'u'}, \\
C. Coma_s &= \frac{2S_2}{2n'u'}, \\
C. x'_t &= (3S_3 + S_4) / 2n'u'^2, \\
C. x'_p &= (S_3 + S_4) / 2n'u'^2, \\
C. DT'' &= \frac{S_5}{2n'u'}. \quad (20)
\end{aligned}$$

上述偏心几何像差分别称为中心垂轴色差、中心子午彗差、中心弧矢彗差、子午像面弯曲、弧矢像面弯曲和切向畸变。

同样可以按照几何像差的允差用 (20) 式求得波差系数值, 代入 (14) 式求各组元允许平移量, 代入 (15) 式求光学系统中某 m 面偏心允许量 δ_m , 或从 (19) 式求得某平面 m 的允许倾角 α_m 。

四、偏心公差计算方法

如果已知光学系统中的各面像差的允差, 则如上述过程, 可求得各面的偏心允许量, 亦即, 光学系统的总像差变化量的允差要适当地分配到各面上去, 才能求得其偏心允许量。这就涉及到像差如何分配的问题。分配方法有两种可能方案。一种是等概率分配, 即各个面的像差允许变化量是一样的。另一种是不等概率分配, 即根据各面对像差变化的灵敏度不一样, 用加权均方求和的方法进行分配。按第一种分配法, 有可能对有的面的偏心公差要

求过严,有的面则过宽。但可以给结构设计者作为机械结构设计参考,应当取什么样的机械结构和哪些面为基准面较合理。装配者也可以根据各面球心偏离对像差影响的灵敏度,来确定合适的装调方案。后一种分配法可能没有过严和特别宽的公差之处,这样就给零件加工者带来方便。

目前,我们采用的方法是先以等概率分配法得到各面球心偏离光轴量,提供结构设计作为机械设计和装配时对偏心要求的依据。在光学零件图纸上调整对偏心要求过严之处,即放宽过严和缩小容易实现之处,但所有零件偏心差对像差影响要在允许范围之内,即

$$T_{S_i}^2 = \sum_{m=1}^K \left(\frac{\partial S_i}{\partial \delta_m} \Big|_0 \right)^2 T_{\delta_m}^2, \quad (21)$$

式中,微分系数 $\frac{\partial S_i}{\partial \delta_m}$ 为单位偏心对像差变化的影响, T_{δ_m} 为各个面的偏心允差, T_{S_i} 为像差总变化量的允许值。

简单的光学系统偏心公差是容易制定的。下面就稍为复杂的光学系统,举例说明偏心公差是如何计算和制定的。

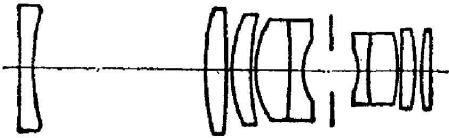


图4 光学系统结构外形图
Fig. 4 Schematic diagram of a microphotographic lens for the electronic circuitry

[例一] 精缩光刻物镜^[3]的偏心公差

精缩物镜用于制作微电子线路光刻掩模版。该镜头缩小10倍,要求在视场 $\phi 8\text{mm}$ 内,用超微粒干版照相时,对于波长为 e 的光,波段宽度在 300\AA 范围内曝光,能制出 $2\mu\text{m}$ 的边缘平整线条。

表1为该镜头的结构参数。图4为光学系统外形结构图。该镜头共有16面, $K=16$ 。根据使用要求和光学设计结果质量,取像差的允差 $C \cdot Coma'_i = \pm 0.001\text{mm}$, $C \cdot DT'' = \pm 0.001\text{mm}$ 。因为用窄波段照相,故偏心引起中心色差可以不考虑。先按下面两个公式求各个面的偏心差。

$$\delta_m = -\frac{2}{3} n'_k u'_k C \cdot Coma'_i \frac{1}{\sqrt{K}} / \left\{ \left(\frac{\sum_{m=1}^K S_I}{y_{0,m}} + \frac{\sum_{m=1}^K S_{II}}{\eta_{0,m}} \right) - \left(\frac{\sum_{m=1}^K S_I}{y_{0,m+1}} + \frac{\sum_{m=1}^K S_{II}}{\eta_{0,m+1}} \right) \right\}, \quad (22)$$

$$\delta_m = -2n'_k u'_k C \cdot DT'' \frac{1}{\sqrt{K}} / \left\{ \left(\frac{\sum_{m=1}^K (3S_{III} + S_{IV})}{y_{0,m}} + \frac{\sum_{m=1}^K 3S_V}{\eta_{0,m}} \right) - \left(\frac{\sum_{m=1}^K (3S_{III} + S_{IV})}{y_{0,m+1}} + \frac{\sum_{m=1}^K 3S_V}{\eta_{0,m+1}} \right) \right\}, \quad (23)$$

式中,右边各项均为已知量。分子 $\frac{2}{3} n'_k u'_k C \cdot Coma'_i \frac{1}{\sqrt{K}} = S_2 = 0.000042$, $2n'_k u'_k C \cdot DT'' \cdot \frac{1}{\sqrt{K}} = S_5 = 0.000126$, $u'_k = 0.2525$ 。分母中的各项由计算两条近轴辅助光线 l 和 l_p , 求得各面的初级像差系数分布值。物面坐标 $\eta_{0,m}$ 和光瞳坐标 $y_{0,m}$ 计算可以列表格进行,更方便的是编成程序由电子计算机实行。

从计算结果表明,对于此类物镜,从切向畸变要求求得各面允许的偏心差较宽,而大部分面的偏心差要从其对中心彗差的影响来求得。其中,要求偏心差小于 $5\mu\text{m}$ 的共有5个

表 1 透镜结构数据

Table 1 The structural data of the lens

面数 m	曲率半径 $r(\text{mm})$	间隔 $d(\text{mm})$	折 射 率 n_e	色 散 $\Delta n_{\Delta\lambda=3.0\mu\text{A}^\circ}$
1	500.02	3.10	1.51830	0.00156
2	40.00	36.19		
3	52.00	5.20	1.75042	0.00284
4	-381.70	0.10		
5	27.50	4.20	1.75042	0.00284
6	71.999	0.10		
7	18.352	7.99	1.75042	0.00284
8	-333.31	1.80	1.76171	0.00534
9	9.524	10.49		
10	-11.012	1.80	1.76171	0.00534
11	85.674	6.48	1.75042	0.00284
12	-18.403	0.10		
13	-464.50	3.10	1.75042	0.00284
14	-29.790	0.10		
15	27.50	4.20	1.75042	0.00284
16	459.05	12.686		
17	像平面			

面,即第 3、5、10、12 和 14 面。最严的是第 10 面, $\delta_{10} = -0.0011$, 相当于 $\alpha_{10} = \delta_{10}/\gamma_{10} = +21''$, 和第 12 面, $\delta_{12} = 0.0022$, 相当于 $\alpha_{12} = -25''$ 。考虑零件加工的方便, 我们对过严和过宽偏心差作调整。若将表 2 数值作为零件各面的偏心允差, 则从(21)式, 求得总的中心彗差变化量 C , $Coma'_l = 0.0011 \text{ mm}$ 。此值是允许的。

表 2 精缩物镜偏心公差

Table 2 Tolerances of a decentered optical system

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\pm\delta_m$	0.35	-.02	.007	.04	.005	-.012	-.015	-.30	-.007	-.002	.07	.004	-.10	.005	.010	-.08
$\pm\alpha_m$	140''	-100''	30''	-30''	38''	-34''	-170''	180''	-150''	40''	180''	-45''	44''	-35''	75''	-36''

表中 δ_m 值带有负号者, 表示与其它带有正号者, 对中心彗差系数 S_2 有同等效果, 即取同样符号的 S_2 量计算得来的。实际零件公差取正负号。这是为了给机构设计和装调时, 考虑正负号影响。

[例二] 广角摄影测量镜头的偏心公差

作为摄影测量用的镜头, 在光学设计时, 特别关注实际像点质量中心位置, 像点几何形状的对称性以及不同波长光的像点漂移。为了满足高精度测量要求, 这种类型镜头对倍率色差、彗差和畸变要有特别好的校正。

图 5 为一种广角摄影测量相机镜头的光学系统外形, 其结构型式为 TOPAR 型, 焦距为 210 mm, 相对孔径 1/4.5, 画面尺寸 180 mm × 180 mm。透镜共有 $K = 16$ 个面, 其中有一个胶合面为平面, 并有一块平行平面玻璃板。

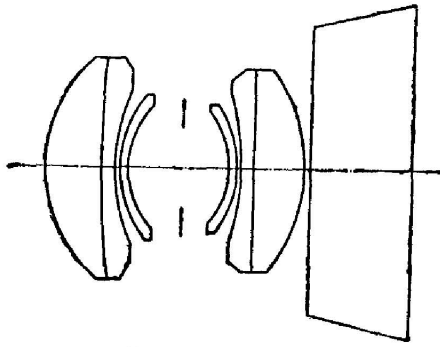


图5 摄影测量物镜光学结构外形图

Fig. 5 Schematic diagram of a wide-angle lens

考虑偏心引起总的中心彗差 $C \cdot Coma'_i \leq 0.01 \text{ mm}$, 中心色差 $C \cdot Tch' \leq 0.005 \text{ mm}$ 和切向畸变 $C \cdot DT' \leq 0.005 \text{ mm}$, 用等概率分配法, 求得各面的波差系数变化量

$$C_2 = n'_K u'_K C \cdot Tch' / \sqrt{K} \leq 0.00016,$$

$$S_2 = \frac{2}{3} n'_K u'_K C \cdot Coma'_i / \sqrt{K} \leq 0.0002,$$

$$S_5 = 2n'_K u'_K C \cdot DT' / \sqrt{K} \leq 0.0003.$$

代入公式(22)、(23)和(24),

$$\delta_m = -C_2 / \left\{ \left(\frac{\sum_m^K C_I}{y_{0,m}} + \frac{\sum_m^K C_{II}}{\eta_{0,m}} \right) - \left(\frac{\sum_{m+1}^K C_I}{y_{0,m+1}} + \frac{\sum_{m+1}^K C_{II}}{\eta_{0,m+1}} \right) \right\}, \quad (24)$$

求得各面球心的偏离量 δ_m 。对平面情况, 在公式(22)、(23)和(24)中, 用 $u_{0,m}$ 代替 $y_{0,m}$, 用 $u_{p0,m}$ 代替 $\eta_{0,m}$, 计算结果为平面的倾斜角 α_m 。计算步骤同例一。

从计算结果表明, 对于此类镜头, 在要求切向畸变小于 $5 \mu\text{m}$ 情况下, 所得各面偏心差较严。特别严的是第3面, $\delta_3 = 0.003$, 相当于 $\alpha_3 = 7''$ 和最后两个平面, 平板楔角为 $8''$ 。这是因为它们在光学系统中的作用是校正畸变。把过于严的和宽的公差作适当调整, 使各面的倾角 α_m 小于 $10''$ 。若表3中的 δ_m (或 α_m) 供结构设计和装校参考, 则 $C \cdot DT' = 0.0051 \text{ mm}$, 此值是允许的。实际零件公差取正负号值。

表3 广角透镜偏心公差

Table 3 Tolerances of a wide-angle decentered optical system

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11~12
δ_m	-0.006	-.20	.005	-.004	.007	.010	-.008	.007	—	-.005	
α_m	-20''	-60''	11''	-18''	40''	-60''	36''	-10''	-60''	16''	10''
γ_m	61.12	702.5	95.61	46.34	35.68	-35.54	-45.91	-131	平面	-65.40	平板

五、结 论

根据多年试用上述偏心公差计算方法, 实践证明此法基本可行。上述两个例子所用镜头均已加工。经检测, 数据与计算结果一致。但偏心是二维变量, 文中所介绍的方法只考虑在子午面内偏心对像质的影响, 所订公差有可能略严。随着生产的进一步发展, 公差有可能略有变动。

作者在运用初级像差理论进行偏心差公式推导和演算时, 曾得到王之江同志的帮助, 特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Г. Г. Слюсарев; «Геометрическая оптика», (М. АН СССР, 1946).
 [2] 王之江; «光学设计理论基础» (科学出版社, 1965) 336~352.
 [3] 常群; «光学设计文集», (科学出版社, 1976) 1~15.

A method of deciding tolerances of decentered optical systems

LIN DAJIAN

(Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica)

(Received 30 April 1981)

Abstract

In this paper, the geometrical optics and third-order aberration theory of decentered optical systems are discussed. And also a method for determining the tolerances of decentered optical systems is described. As examples, we calculate the tolerances of decentered errors for the two typical optical systems: A high performance microphotographic lens and a wide-angle photogrammetric lens.

第二届全国光信息处理学术报告会

第二届全国光信息处理学术报告会于1981年9月8日至13日在青岛市召开。报告会由中国光学学会领导,并委托北京物理所、长春光机所和山东海洋学院等单位具体筹备组织的。出席会议的代表81名,列席代表23名。这些代表分别来自国家科委所属单位、中国科学院、高等院校、工业部门等50余个单位。

会上宣读了论文报告80余篇,除几篇特约报告外,宣读的论文报告是由筹备会议的学术小组以评分方式从会前征得的120余件稿件中选出来的。

副理事长王之江在会上作了题为《光学信息处理的现状与展望》的综述报告(右图)。他说,光学信息处理还处于不成熟的阶段,并且具有很强的探索性和应用目的性,光学信息处理中图象信息处理占很大比重,但是,图象信息的数字处理已经发展得比光学处理成熟得多,作为图象处理的各种重要运算,例如增强、复原、判别、编码、信息综合等,数字处理显然是最主要的手段。当然,对若干特殊应用,光学处理方法可以有自己独特的长处,光学处理是一种模拟运算,因此适宜做成专用机,当数据量十分庞大并运算为线性时,则光学方法就显得比数字方法优越,他指出,要注意发挥光学处理的长处,并结合电子学和计算机的灵活性,形成有竞争能力的工作。光学信息的处理过程包括各个环节和各种单元要发挥各自的专长,做有特色的工作。



合肥等离子所副所长霍裕平作了“空间可变相干光学变换”的特约报告。他列举了近二年来国内外在

(下转第47页)