

失调同轴三反消像散系统消彗差补偿

徐少雄^{1,2} 陈长征¹ 张星祥¹ 任建岳¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 三阶彗差是同轴三反消像散(TMA)光学系统镜面失调产生的主要像差之一。使用矢量像差理论分析了同轴TMA光学系统失调后彗差变化特性,给出了次镜和三镜像差偏移矢量的求解方法及公式,并推导了系统次镜和三镜失调导致的彗差增量系数公式,证明了三镜在 X - Y 平面内偏心产生的彗差可以通过一个固定比例的次镜偏心量完全补偿,提出了次镜对偏心三镜的消彗差补偿条件、次镜和三镜各自的 X - Y 平面偏心无彗差条件。计算了同轴TMA光学系统中三镜失调的两个例子,在消彗差补偿条件下,经过次镜主动偏心补偿,全视场均值彗差增量仅为未失调前的0.6%和1.9%,证明了消彗差补偿条件的正确性。

关键词 成像系统; 消彗差; 补偿; 三反消像散光学系统; 矢量像差; 主动光学

中图分类号 TH743 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1022004

Coma-Free Compensation in Perturbed On-Axis Three-Mirror Anastigmatic System

Xu Shaoxiong^{1,2} Chen Changzheng¹ Zhang Xingxiang¹ Ren Jianyue¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Three-order coma is one of the main aberration types to produce mirror disorders of coaxial three-mirror astigmatism (TMA) optical system. The variation characteristics of coma in perturbed coaxial TMA optical system is analyzed using vector aberration theory. The solving method and formula of aberration displacement vectors of secondary mirror and three mirror is proposed, and the coma increment coefficient formula caused by secondary mirror and three mirror of system is deduced. It is proved that the three-order coma produced by decenter of tertiary mirror in X - Y plane can be totally compensated by constant ratio of decenter amount of secondary mirror. The coma-free compensation condition of secondary is proposed, and the coma-free decenter conditions of secondary mirror and tertiary mirror are proposed respectively. Two examples of disordered three mirror in coaxial TMA optical system are used to calculate the coma-free compensation condition. Under the condition of coma-free compensate, the all field of view mean coma increment is only 0.6% and 1.9% before disorder, which shows the validity of the proposed coma-free compensation condition.

Key words imaging systems; coma-free; compensation; three-mirror anastigmatic optical system; vector approach; active optics

OCIS codes 220.3620; 230.4040; 080.1005; 350.1260

1 引言

1976年, Buchroeder^[1]在其博士论文中首次提出了在像面上轴对称光学系统各个表面在视场中的像差贡献也是旋转对称的,这种对称性并没有因为失调而改变,只是每个表面的像差贡献中心发生了偏移而不再重合。1980年, Shack等^[2]利用Buchroeder提出的观点,将失调光学系统的波像差用矢量的形式表示,提出

收稿日期: 2015-03-26; 收到修改稿日期: 2015-04-27

基金项目: 国家863计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 徐少雄(1987—)男,博士研究生,主要从事光学成像、主动光学等方面的研究。E-mail: hitxsx@163.com

导师简介: 任建岳(1952—)男,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感器的研制和性能评价等方面的研究。

E-mail: reny@sohu.com

了矢量像差理论。理论解释了失调光学系统中出现的双节点像散现象,因此也叫节点像差理论。矢量像差理论阐释了光学系统中,像差对称中心偏移的特性,可用于分析失调轴对称光学系统、平面对称光学系统和离轴光学系统^[2-4]。另外,矢量波像差解释了两反卡塞格林系统次镜自由彗差点现象^[5]。国内也使用矢量像差理论进行三反射镜光学系统的设计及装调^[6-8]。

镜面失调主要产生像散和彗差^[9],同时镜面变形也会产生像差^[10]。像差主动补偿技术可弥补系统失调产生的像差问题,对保证系统成像质量具有重要的意义^[11-12]。本文利用矢量像差理论,在不考虑镜面变形下,分析同轴三反消像散(TMA)光学系统次镜和三镜各自无彗差(下文均指三阶彗差)偏心条件,并分析了一般情况下,三镜偏心导致的彗差可通过一定比例的次镜偏心进行补偿,使系统在像面中的彗差为零的条件,得出了这个比例不随三镜偏心量的变化而变化的结论。通过一个同轴三反光学系统的例子,证明了消彗差补偿的正确性。消彗差补偿的分析对光学系统的设计、装调具有重要的指导意义。对于彗差为主要像差的失调光学系统,这种补偿性对在镜面较小的次镜上运用主动光学以调整系统像差具有十分重要的指导意义。

2 矢量像差理论

矢量像差理论将系统各个镜面的像差贡献分开表示,是研究镜面失调的有力工具。该理论对轴对称型同轴TMA光学系统镜面失调的研究具有指导作用,而不需要采用大量光线追迹的方法研究镜面失调后系统的像差特性。根据矢量像差理论,出瞳处的波像差可由归一化的像平面矢量 \mathbf{H} 和归一化的出瞳平面矢量 \mathbf{r} 表示,如图1所示。

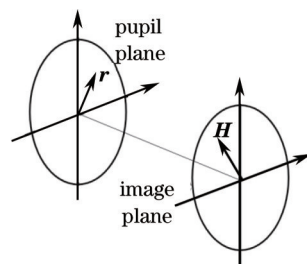


图1 像平面及出瞳平面归一化矢量

Fig.1 Normalized vectors in exit pupil plane and image plane

系统波像差(彗差部分)可通过将所有表面的彗差贡献相加得到,

$$W_{131} = \sum_j W_{131j} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{r}) (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \quad (1)$$

式中 W_{131j} 表示第 j 个表面在最大视场处的彗差, \mathbf{H} 则通过这个视场在焦平面的宽度归一化, \mathbf{r} 则用出瞳平面最大半径进行归一化。

矢量像差理论认为,轴对称光学系统每个表面的像差贡献和对称性不会因为表面的失调而改变,只是每个表面的像差贡献中心发生的偏移,偏移量随失调量变化而变化。图2(a)显示的是某个表面未偏心时,不同视场的彗差值分布,其中像差贡献中心的彗差为零。当表面失调后,导致了该表面像差贡献中心发生偏移,从而导致彗差分布发生了整体偏移,而大小形式并未改变,如图2(b)所示。一般情况下,某个表面的偏心倾

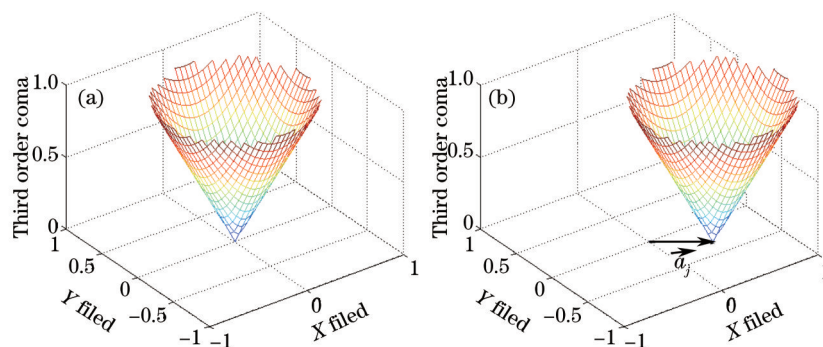


图2 不同视场的彗差值分布。(a)表面未偏心时;(b)表面偏心时

Fig.2 Coma value distribution in different field of views. (a) When surface is non-eccentric; (b) when surface is eccentric

斜,会导致这个表面及其后面的表面的像差贡献中心都发生偏移。

对于第 j 个表面,其归一化像差偏移矢量用 \mathbf{a}_j 表示,如图 2(b)所示,则这个表面的视场矢量可表示为

$$\mathbf{H}_j = \mathbf{H} - \mathbf{a}_j \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,则失调后光学系统三阶彗差的波像差可改写为

$$\begin{aligned} W_{131} &= \sum_j W_{131j}(\mathbf{H}_j \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \\ &= \sum_j W_{131j}[(\mathbf{H} - \mathbf{a}_j) \cdot \mathbf{r}](\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \\ &= \sum_j W_{131j}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) - \sum_j W_{131j}(\mathbf{a}_j \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (3)$$

联合(1)式及(3)式,可得到表面失调增加的彗差,表示为

$$\begin{aligned} \Delta W_{131} &= -\sum_j W_{131j}(\mathbf{a}_j \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \\ &= -W_{131,1}^o(\mathbf{a}_1^o \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) - W_{131,1}^*(\mathbf{a}_1^* \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) - W_{131,2}^o(\mathbf{a}_2^o \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \\ &\quad - W_{131,2}^*(\mathbf{a}_2^* \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) - W_{131,3}^o(\mathbf{a}_3^o \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) - W_{131,3}^*(\mathbf{a}_3^* \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $W_{131,j}^o$ 和 $W_{131,j}^*$ 分别表示第 j 个光学表面中球面部分和非球面部分像差贡献。(4)式只与像差偏移矢量 \mathbf{a}_j 有关而与视场矢量无关,说明失调位置确定的光学系统,系统在视场内增加的彗差为常量。只要求出光学系统每个表面的 \mathbf{a}_j ,即可求出系统增加的常量彗差。

\mathbf{a}_j 的定义为一个由光轴光线(OAR)与像面的交点指向该表面在物(像)平面像差贡献中心的矢量。OAR是失调光学系统中,一条由物面中心发出,经过入瞳中心,再依次经过各个表面及出瞳中心,最终到达像面的真实存在的光线。对于未失调轴对称光学系统,光轴光线相当于系统的光轴。一个球面的像差贡献中心存在于连接该表面的曲率中心和该表面的入瞳中心的直线上,该直线和物(像)平面的交点则为该表面在物(像)平面像差贡献中心。非球面表面的像差贡献中心分为球面部分和非球面部分:球面部分的像差贡献中心和球面表面一致,非球面像差贡献中心存在与连接该表面入瞳中心和非球面顶点的直线上。轴对称光学系统中,上述两条直线是重合的,失调后,这两条直线一般不再重合,意味着一个表面中的球面和非球面像差贡献中心不再重合,导致了像差的产生。

3 同轴TMA光学系统消彗差补偿

3.1 同轴TMA系统

同轴TMA光学系统具有中间像面及实出瞳,容易抑制杂散光,没有色差。以此为基础,利用偏视场可消除二次遮拦,通过光阑离轴可设计为RUG型TMA光学系统,同COOK型TMA光学系统在航天相机中应用价值巨大^[6,13-14]。针对主镜为入瞳的同轴TMA光学系统,利用矢量像差理论,分析在次镜和三镜偏心时像差的变化及次镜偏心对三镜偏心在彗差上的补偿特性。存在中间像面的同轴TMA光学系统结构如图3所示。

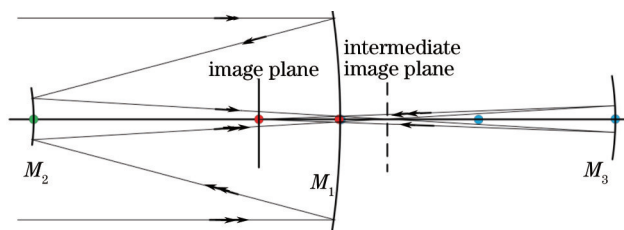


图3 同轴TMA光学系统

Fig.3 Coaxial TMA optical system

入瞳在主镜上,因此主镜非球面部分只影响球差而不影响与视场有关的其他像差。主镜的顶点即为入瞳中心,则物面中心在主镜光轴上,像面中心则是主镜光轴经过次镜、三镜成像后,与像平面的交点。主镜的像差贡献中心和物面中心、入瞳中心在一条直线上,因此主镜像差贡献中心和像面中心重合,即 $\mathbf{a}_1^o = 0$, $\mathbf{a}_1^* = 0$,则(4)式表示的波像差增量公式(彗差部分)可简化为

$$\begin{aligned} \Delta W_{131} &= -W_{131,2}^o(\mathbf{a}_2^o \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) - W_{131,2}^*(\mathbf{a}_2^* \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) - W_{131,3}^o(\mathbf{a}_3^o \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \\ &\quad - W_{131,3}^*(\mathbf{a}_3^* \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \\ &= -(W_{131,2}^o \mathbf{a}_2^o + W_{131,2}^* \mathbf{a}_2^* + W_{131,3}^o \mathbf{a}_3^o + W_{131,3}^* \mathbf{a}_3^*) \cdot \mathbf{r}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (5)$$

当次镜和三镜偏心后,系统的彗差增量只与次镜和三镜的像差偏移矢量有关。由于 $W_{131} = k/2$, k 为彗差的赛德尔系数。由(5)式,定义彗差增量矢量 ΔS 为

$$\Delta S = k_2^o a_2^o + k_2^* a_2^* + k_3^o a_3^o + k_3^* a_3^*, \quad (6)$$

式中 k_j^o 和 k_j^* 分别表示失调前光学系统在最大视场下,第 j 个表面球面部分和非球面部分彗差的赛德尔系数。(6)式反映了(5)式中彗差增量的大小及方向。当光学系统的次镜和三镜沿着同一个方向偏心时,由像差偏移矢量定义可知,(6)式中的像差偏移矢量共线,这时候 ΔS 才可能为零。式中三反系统第 j 个表面的球面部分和非球面部分的彗差系数 k_j^o 和 k_j^* 为^[15]

$$\begin{cases} k_j^o = -n_j i_j n_j i_{prj} \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_j \\ k_j^* = \left(\frac{y_{prj}}{y} \right) c_j^3 (n_j' - n_j) K_j y_j^4 \end{cases}, \quad (7)$$

式中下标 pr 表示近轴主光线,其他的为近轴光线, n 和 n' 分别表示表面反射前后介质折射率, y 表示光线高度, K 为二次曲面常数, c 表示曲率半径的倒数, i 表示入射角, u 表示光线与光轴夹角。

3.2 失调TMA系统

考察次镜和三镜在子午平面内的偏心情况,如图4所示。

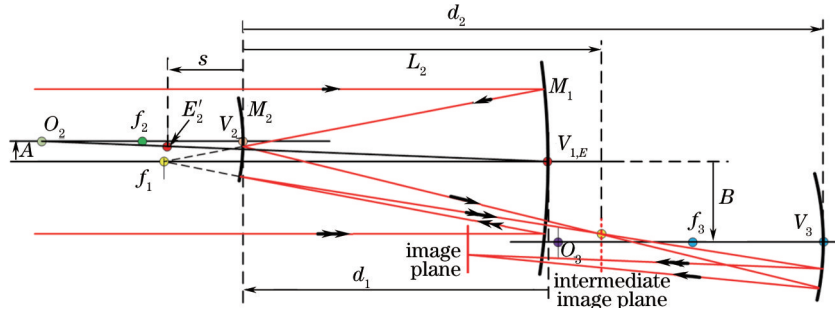


图4 偏心后的光学系统

Fig.4 Eccentric optical system

图中 E'_x 表示主镜顶点,即入瞳中心经过第 x 个镜面所成的像, E'_2 在直线 O_2E 上。 L_2 表示次镜到中间像面的距离, A 和 B 分别表示次镜和三镜光轴相对于主镜光轴的偏心, A 为正, B 为负。 s 表示 E'_2 到次镜的距离,其值可通过凸球面成像公式求出,作为一个已知量简化后续公式推导。

$$s = r_2 d_1 / (2d_1 + r_2). \quad (8)$$

根据定义,要求出 ΔS 中4个像差偏移矢量,首先求出 E'_2 、 O_2 和 V_2 经过三镜成像后的 E'_3 、 O'_2 和 V'_2 , 再求出直线 $E'_3O'_2$ 、 $E'_3V'_2$ 、 E'_3O_3 和 E'_3V_3 与像面的交点和像面中心 Q (即 f_1 点在像平面的位置),最后求出4个像差偏移矢量。在次镜的像空间求出上述4条直线(分别记为 l_{02} 、 l_{v2} 、 l_{03} 、 l_{v3})和 $E'_2Q'_2$ (记为 l_Q , Q'_2 为 f_1 点经过次镜成像在中间像面的像)的斜率,再求出经过三镜后,这5条直线的斜率。 l_{02} 、 l_{v2} 、 l_{03} 、 l_{v3} 和 l_Q 如图5所示,它们都经过点 E'_2 。

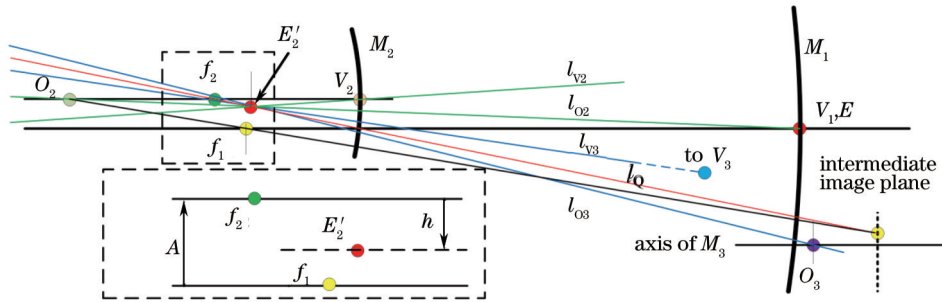


图5 光学系统

Fig.5 Optical system

图中 h 表示 E'_2 偏离次镜光轴的距离,由次镜的成像公式,其值为

$$h = -sA/d_1, \quad (9)$$

定义参数

$$\begin{cases} H = d_2 - s \\ T = d_2 - s + r_3 \end{cases}, \quad (10)$$

则 $l_{02}, l_{v2}, l_{03}, l_{v3}$ 和 l_Q 的斜率可表示为

$$\begin{cases} U_2^o = h/(s - r_2) \\ U_2^* = h/s \\ U_3^o = (B - A - h)/T, \\ U_3^* = (B - A - h)/H \\ U_Q = (d_1 - s)A/d_1s \end{cases}, \quad (11)$$

式中 $U_2^o, U_2^*, U_3^o, U_3^*$ 和 U_Q 分别表示 $l_{02}, l_{v2}, l_{03}, l_{v3}$ 及 l_Q 的斜率。每条直线经过三镜, 都有不同的放大率, 经过计算, 并将 h 的表达式代入, 则这 5 条直线经过三镜后, 斜率可分别表示为

$$\begin{cases} U_2^{o'} = [2B - 2A - U_{02}(2d_2 - 2r_2 + r_3)]/(T - H) \\ U_2^{*'} = [2B - 2A - U_{v2}(2d_2 + r_3)]/(T - H) \\ U_3^{o'} = (B - A - h)/T \\ U_3^{*'} = (A + h - B)/H \\ U_Q' = [2B - 2A - 2h - U_Q(T + H)]/(T - H) \end{cases}. \quad (12)$$

$l_{02}, l_{v2}, l_{03}, l_{v3}$ 及 l_Q 经过三镜后, 为 $l'_{02}, l'_{v2}, l'_{03}, l'_{v3}$ 和 l'_Q , 其位置如图 6 所示, 这 5 条直线同时经过点 E'_3 。

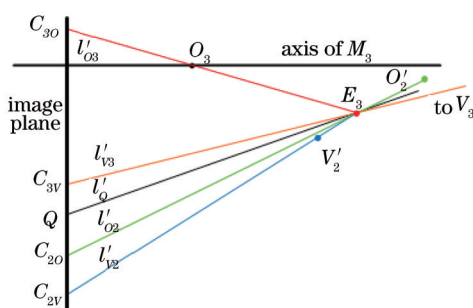


图 6 光线图

Fig.6 Light chart

图中 Q 为像面中心, C_{30} 即为三镜球面部分的像差贡献中心, 则 QC_{30} 为三镜球面部分的像差偏移矢量。 QC_{30} 的大小可以通过求解 Q 到 C_{30} 的距离得出, 其他矢量求法类似。由于 \mathbf{a}_j 在一个平面内, 可将矢量符号去掉, 只保留其正负号, 则归一化像差偏移矢量的值为

$$a_j = (U_j' - U_Q')L_{E'_3}/L = \Delta U_j L_{E'_3}/L, \quad (13)$$

式中 $L_{E'_3}$ 表示 E'_3 到像平面的水平距离, L 为系统未失调前, 最大视场成像点距离像面中心的距离, 用以归一化像差偏移矢量。 ΔU_j 可由(12)式求出, 经过化简及合并得

$$\begin{cases} \Delta U_2^o = \frac{T+H}{T-H} \left[\frac{d_1-s}{sd_1} - \frac{s}{d_1(r_2-s)} \right] A \\ \Delta U_2^* = \frac{T+H}{T-H} \cdot \frac{A}{s} \\ \Delta U_3^o = \frac{T+H}{T-H} \left[\frac{d_1-s}{d_1} \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{T} \right) A - \frac{B}{T} \right] \\ \Delta U_3^* = \frac{T+H}{T-H} \left[\frac{d_1-s}{d_1} \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{H} \right) A - \frac{B}{H} \right] \end{cases}. \quad (14)$$

A 和 B 的系数都是系统结构参数, 为常数, 记

$$\begin{cases} C_2^o = \frac{d_1 - s}{sd_1} - \frac{s}{d_1(r_2 - s)} \\ C_2^* = 1/s \\ C_{3a}^o = \frac{d_1 - s}{d_1} \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{T} \right) \\ C_{3b}^o = -1/T \\ C_{3a}^* = \frac{d_1 - s}{d_1} \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{H} \right) \\ C_{3b}^* = -1/H \\ P = (T + H)/(T - H) \end{cases} \quad (15)$$

联合(6)式、(13)式及(15)式,并去掉矢量符号,彗差增量矢量变成彗差增量系数,

$$\Delta S = (k_2^* C_2^* A + k_2^o C_2^o A + k_3^* C_{3a}^* A + k_3^* C_{3b}^* B + k_3^o C_{3a}^o A + k_3^o C_{3b}^o B) PL_{k_3} / L \quad (16)$$

彗差增量系数公式表明,系统镜面偏心导致镜面像差贡献中心发生了偏移,并且和偏心量 A 、 B 成正比。(16)式表示的彗差增量系数可分为三种情况:

1) 当 $k_2^* C_2^* + k_2^o C_2^o + k_3^* C_{3a}^* + k_3^o C_{3a}^o = 0$ 时,彗差增量系数与 A 无关,为次镜 Y 方向位移失调无彗差条件。其原理是次镜在 Y 方向上的偏心,导致次镜和三镜的球面和非球面部分产生的彗差互相抵消,而不产生彗差。

2) 当 $k_3^* C_{3b}^* + k_3^o C_{3b}^o = 0$ 时,彗差增量系数与 B 无关,得到三镜 Y 方向偏心无彗差条件

$$\frac{k_3^o}{k_3^*} = \frac{r_3}{s - d_2} - 1 \quad (17)$$

即在未失调光学系统中的最大视场下,三镜球面部分彗差系数及其非球面部分彗差系数满足(17)式时,无论三镜沿着 Y 方向偏移量为多少,都不会在像面上产生彗差。事实上由于彗差与视场成正比,只要任一个视场下的彗差系数值满足(17)式,都是三镜 Y 位移失调无彗差条件。三镜 Y 方向无彗差偏心的原理是三镜偏心导致其球面和非球面部分产生了彗差,这两部分彗差相互抵消。

3) 当1)和2)都不满足时,则存在一个比例 m ,当 $A = mB$ 时,使彗差增量系数为零,求得

$$m = - \frac{k_3^* C_{3b}^* + k_3^o C_{3b}^o}{k_2^* C_2^* + k_2^o C_2^o + k_3^* C_{3a}^* + k_3^o C_{3a}^o} \quad (18)$$

当 m 满足(18)式时,三镜 Y 向偏心产生的彗差可由次镜在 Y 向的主动偏移予以全部补偿。(18)式称为次镜消彗差补偿条件。其值与次镜和三镜的彗差及系统结构参数有关,与 B 无关,是一个常数。

事实上,由于系统的对称性,只要保证 A 和 B 共线,即使次镜、三镜在 X - Y 平面内偏心,次镜、三镜各自无彗差偏心条件和次镜消彗差补偿条件都是成立的。

4 同轴 TMA 光学系统消彗差补偿例证

4.1 消彗差补偿例证

入瞳在主镜上的同轴 TMA 光学系统参数如表 1 所示。主镜口径为 3000 mm,焦距为 35000 mm,设计的全视场角为 $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ 。

表 1 TMA 光学系统参数

Table 1 TMA optical system parameters

Mirror	Radius /mm	Distance /mm	K
M_1	-9589.4036	-3811.7807	-0.9694
M_2	-2519.4123	7237.8203	-2.1574
M_3	-3405.4606	-4433.7555	-0.5243

通过(7)式、(14)式和(18)式的计算,可得, $m = -0.01825$ 。由于失调产生的彗差在全视场内都为常量,所以只需要考察(0,0)视场下的彗差增量系数。图 7 为当三镜和次镜分别沿 Y 方向偏心时,(0,0)视场的彗差增量系数变化。

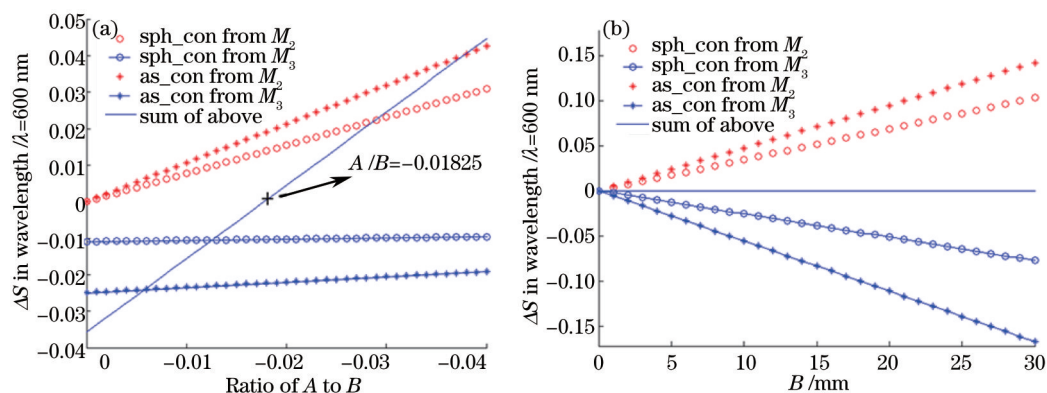


图7 系统彗差随三镜和次镜偏心的变化。(a) 当 $B=-4$ mm时, A 对彗差的影响;(b) 当 $m=-0.01825$ 时,不同的 B 值对彗差的影响

Fig.7 System coma along with the change of eccentric in three mirror and secondary mirror . (a) When $B=-4$ mm, A impacts on coma; (b) when $m=-0.01825$, different B values impact on coma

由图7(a)可知,三镜偏心时,系统在像面产生了常量的彗差。当次镜同时偏心时,系统的彗差得以校正,当次镜偏心量满足消彗差补偿条件时,三镜偏心产生的彗差被次镜的主动偏心予以全部补偿。图7(b)则说明了当次镜满足消彗差补偿条件时, B 值的改变并不改变系统的彗差,消彗差补偿条件为常数。图8为在 $(B=0, A=0)$ 、 $(B=-4, A=0)$ 、 $(B=-4, A=mB)$ 和 $(B=13.5, A=mB)$ 四种情况下,系统在全视场下的彗差情况。

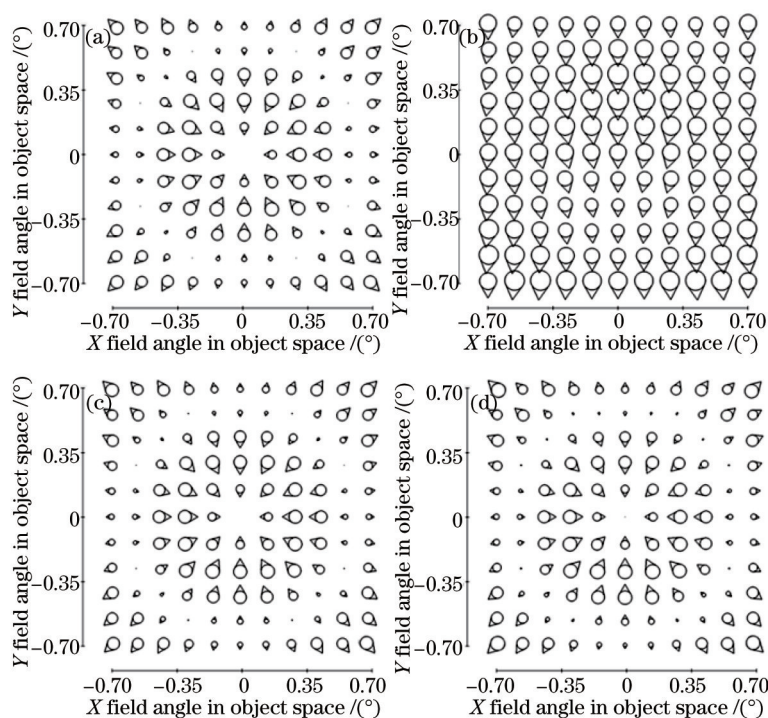


图8 彗差变化。(a) $(B=0, A=0)$; (b) $(B=-4, A=0)$; (c) $(B=-4, A=mB)$; (d) $(B=13.5, A=mB)$

Fig.8 Change of coma.(a) $(B=0, A=0)$; (b) $(B=-4, A=0)$; (c) $(B=-4, A=mB)$; (d) $(B=13.5, A=mB)$

表2列出了图8四种情况下,全视场彗差值的参数。

表2 图8中四种情况下的彗差参数

Table 2 Coma parameters under four cases in Fig.8

	Min	Max	Average
Fig.8(a)	0	0.07849	0.04654
Fig.8(b)	0.2139	0.3669	0.2939
Fig.8(c)	1.581×10^{-4}	0.08013	0.04682
Fig.8(d)	5.550×10^{-4}	0.08387	0.04742

在 $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ 全视场下,系统彗差的平均值在次镜补偿后,彗差的变化量分别为0.6%和1.9%。因此,在全

视场下,三镜的Y偏心导致的彗差被次镜补偿了,证明了同轴TMA光学系统消彗差补偿条件的正确性。

4.2 消彗差补偿的意义

三镜偏心主要产生彗差和像散两种像差^[11],图9为系统三镜偏心和偏心导致的彗差、像散增量关系。

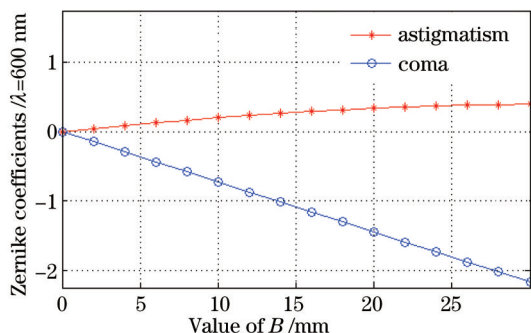


图9 B参数和系统彗差、像散增量的关系

Fig.9 Relationship between B and system coma and astigmatism

图9说明三镜偏心产生的彗差与偏心量呈线性关系,像散与偏心量呈非线性关系,彗差为主要的像差成分。在($B=-4, A=0$)和($B=-4, A=mB$)情况下,系统调制传递函数(MTF)变化如图10所示。

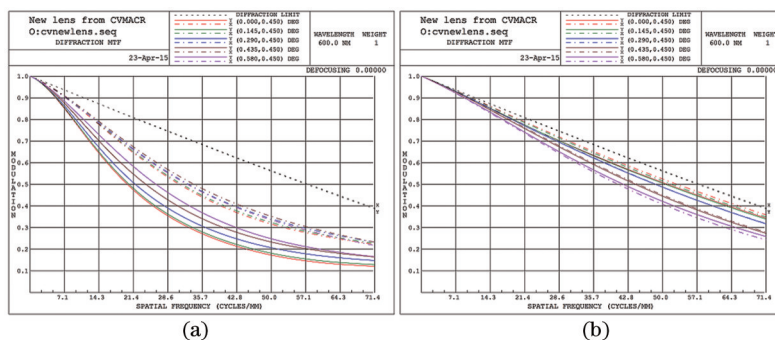


图10 光学系统 MTF。(a) ($B=-4, A=0$); (b) ($B=-4, A=mB$)

Fig.10 MTF of optical system. (a) ($B=-4, A=0$); (b) ($B=-4, A=mB$)

图10说明三镜偏心导致系统MTF下降,通过次镜的主动偏心补偿后,MTF上升,成像质量得到提高。由于三镜失调产生的彗差可通过次镜完全消除,当光学系统次镜和三镜的像散分布系数越小(可通过光学设计实现),其失调产生的像散值就越小,则MTF提升越多,次镜对三镜失调的补偿能力越强。消彗差补偿条件实际上解释了次镜刚体位移参数对三镜刚体位移参数的补偿作用。当大口径空间相机次镜设置成空间六自由度可调整镜面时,次镜可弥补由于三镜和主镜相对位置变化导致的成像质量下降问题。另外,通过减小次镜和三镜的像散分布系数,利用次镜和三镜各自的无彗差偏心条件可设计大装调公差的光学系统。

5 结 论

通过矢量像差理论分析,在次镜像空间计算像差贡献中心所在直线的斜率,三镜像空间计算最终像差贡献中心所在直线的斜率,得到了失调后同轴TMA光学系统的像差贡献中心并以此推导了三阶彗差增量系数公式,得到了次镜和三镜各自无彗差X-Y平面偏心条件及次镜对偏心三镜的消彗差补偿条件。在某同轴TMA光学系统中,任意选择两种三镜偏心情况,经过次镜消彗差补偿后,系统在全视场下的彗差均值增量仅为0.6%和1.9%。理论推导证明,次镜和三镜分别存在X-Y平面偏心无彗差条件;理论及例证同时证明,次镜的主动偏心可全部补偿三镜偏心产生的彗差。对同轴TMA光学系统的光学设计、装调,特别是在次镜上运用主动光学技术对系统像差进行调整起到重要的指导作用。

参 考 文 献

1 Buchroeder R A. Tilted Component Optical Systems[D]. Aricoha: University of Arizona, 1976.

- 2 Shack A R V, Thompson K. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field[C]. Proceedings of SPIE, 1980, 0251: 146–153.
- 3 Thompson K P, Fuerschbach K, Schmid T, *et al.*. Using nodal aberration theory to understand the aberrations of multiple unobscured three mirror anastigmatic (TMA) telescopes[C]. SPIE, 2009, 7433: 74330B.
- 4 Moore L B, Hvise A M, Sasian J. Aberration fields of a combination of plane symmetric systems[J]. Opt Express, 2008, 16(20): 15655–15670.
- 5 Ren B, Jin G, Zhong X. Third-order coma-free point in two-mirror telescopes by a vector approach[J]. Appl Opt, 2011, 50(21): 3918–3923.
- 6 Yang Xiaofei, Han Changyuan. Study on decision of alignment priority using mirror tolerance in a three mirror off-axis optical system [J]. Optical Technique. 2005, 31(2): 173–176.
杨晓飞, 韩昌元. 利用离轴三反镜光学系统确定各镜的装调公差[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 173–176.
- 7 Zhong Xing, Jin Guang. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore optics[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022004.
钟 兴, 金 光. 超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022004.
- 8 Che Chicheng, Li Yingcai Fan Xuewu, *et al.*. Research on Computer-aided Alignment Based on Vector Aberration Theory[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1630–1634.
车驰骋, 李英才, 樊学武, 等. 基于矢量波像差理论的计算机辅助装调技术研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1630–1634.
- 9 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Misalignment induced aberration characteristic of TMA optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 653–657.
庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 失调三反消像散光学系统像差特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 653–657.
- 10 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422002.
庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422002.
- 11 Chen Hua, Su Dongqi, Sui Yongxin, *et al.*. Active compensation of thermal aberrations in lithographic projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0811001.
陈华, 苏东奇, 隋永新, 等. 光刻机投影物镜热像差主动补偿方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0811001.
- 12 Liu Chunlai, Huang Wei, Shang Hongbo, *et al.*. Compensation using clocking lens elements in high imaging performace opical systems [J]. Acta Optica Sinica, 2013 33(9): 0911001.
刘春来, 黄 玮, 尚红波, 等. 高成像质量光学系统的元件旋转补偿[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0911001.
- 13 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822002.
朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822002.
- 14 Liu Jianfeng, Wang Huijun, Sun Dewei, *et al.*. On-orbit adjustment and compensation for large aperture optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322005.
刘剑峰, 王慧军, 孙德伟, 等. 大口径光学系统在轨调整补偿能力[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322005.
- 15 Wilson R N. Reflecting Telescope Optics[M]. Berlin: Springer, 1999.

栏目编辑: 苏 岑