

光学学报

层叠微透镜阵列扫描成像系统的动态像差

潘志达¹, 苏晓琴¹, 周岩², 穆郁², 吉佳瑞¹, 杨磊^{1*}, 谢洪波¹

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

²天津航技术物理研究所, 天津 300308

摘要 以层叠微透镜阵列扫描成像系统的动态像差为研究目标, 基于非旋转对称光学系统的矢量波像差理论, 建立了层叠微透镜阵列扫描成像系统的动态波像差理论模型, 提出一种可用于系统波像差计算的适用性方法。同时, 将动态波像差模型应用于两片式微透镜阵列扫描结构的像差分析中, 分析了多扫描视场下的初级波像差以及均方根(RMS)波前差, 并计算了不同扫描视场下的初级波像差值在光学表面上的分布。所得研究结果对层叠微透镜阵列扫描成像系统的设计优化与装调实验具有理论指导和工程化意义。

关键词 成像系统; 红外成像; 微透镜阵列; 扫描系统; 动态波像差; 矢量像差理论

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230552

1 引言

红外成像技术具有隐蔽性高、抗干扰能力强以及能够在恶劣环境下识别目标等优点, 在军用和民用等领域都有着广泛的应用需求和良好的发展前景^[1-6]。然而, 受到半导体制作工艺的限制, 大面阵、高分辨率红外探测器的工程化和商用化仍难以实现^[2]。近年来, 随着扫描式光学系统不断发展, 扫描技术逐渐成为扩大红外成像系统视场的主要方法之一。

在光学成像系统中, 传统的扫描方式主要分为机械式和电子式两类。随着光束扫描应用场景的不断扩展, 传统的机械式扫描方式已无法满足当前对设备的微型化、低功耗和高精度等需求^[7-8], 而电子式扫描也存在着扫描视场较小、光透过率低和光束质量差等问题^[9]。自 20 世纪 80 年代以来, 微光学元件的加工工艺日渐成熟, 在光束整形^[10]、光束扫描^[11-12]等领域利用微光学元件的扫描方式逐渐代替传统扫描方式。其中, 由层叠微透镜阵列构成的微扫描器可通过微透镜阵列间 μm 量级的相对位移来实现光束偏转, 从而实现高频率的动态扫描成像^[13]。

对于层叠微透镜阵列扫描成像系统的研究, 国内外已利用光学设计软件实现了层叠微透镜阵列的设计。例如: Akatay 等^[14]采用斯特列尔(Strehl)比作为评价标准对层叠微透镜阵列扫描成像系统进行了设计, 其设计结果具有接近衍射极限的性能和较高的 Strehl 比; 王瑶^[9]则通过对出射光束的聚焦点列图进行评价,

实现了两片式系统的设计。以上设计仅包含较少的微透镜阵列, 而层叠微透镜阵列扫描成像系统的发展趋势为多镜式结构^[7], 并且微透镜阵列子单元的尺寸在 mm 甚至 μm 量级, 这对微透镜阵列的装调或公差提出了较高的要求, 因此建立适用的理论模型指导微透镜阵列的装调也是重要的研究方向之一。

经典的离轴反射式光学系统装调先利用干涉法测量系统的实时波前, 再将测量的波前转化为像差, 根据像差来判断反射镜的失调情况, 从而通过调节反射镜位姿来完成波前补偿或元件装调^[15]。类比该方法, 研究层叠微透镜阵列扫描成像系统的像差有望解决微透镜阵列的装调校正问题。关于层叠微透镜阵列扫描成像系统像差的研究, 国内外有一些代表性的工作, 包括: Gibson 等^[8]考虑了层叠微透镜阵列扫描成像系统的色差, 设计了一套包含 3 组胶合透镜的扫描系统; Ge 等^[16]基于最小球差原理提出了一种两片式层叠微透镜阵列扫描成像系统的初始结构建立方法, 该方法有利于系统的结构设计。以上对层叠微透镜阵列扫描系统像差的研究仅适用于系统的设计阶段, 要实现微透镜阵列的精密装调, 还需进一步研究层叠微透镜阵列扫描系统的动态像差。

本文以建立准确的动态像差模型为目标, 以指导微透镜阵列的设计优化和装调测试为目的, 对层叠微透镜阵列扫描成像系统进行了动态像差的定量分析。以具有重复结构的单元扫描系统产生的动态像差为研究对象, 将单元扫描系统等效为非旋转对称光学系统,

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-03-19; 录用日期: 2023-04-20; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 基础加强计划重点基础研究项目(2020JCJQZD06600)

通信作者: *yanglei@tju.edu.cn

建立了非旋转对称光学系统的矢量波像差理论模型,并基于该模型对扫描过程中的单元扫描系统进行波像差研究。

2 基本原理

2.1 层叠微透镜阵列扫描成像系统的扫描工作原理

层叠微透镜阵列扫描成像系统是由两组微透镜阵列层叠排布构成的,每组微透镜阵列中的微透镜

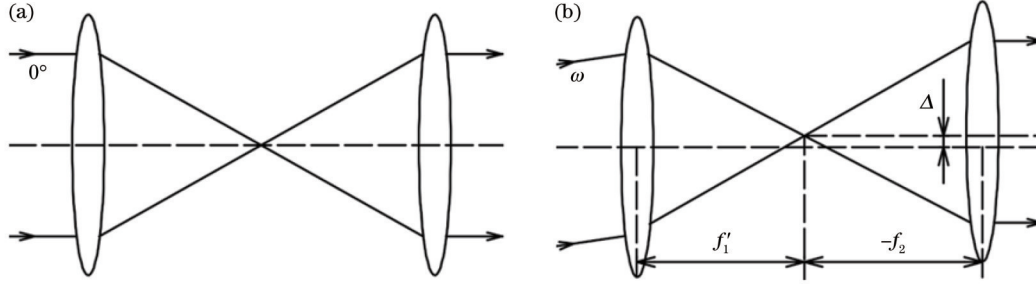


图 1 单元扫描系统工作原理。(a)0°扫描视场;(b)ω扫描视场

Fig. 1 Unit scanning system working principle. (a) 0° scanning field of view; (b) ω scanning field of view

在 0°扫描视场中,成像光束平行于光轴入射到固定组,在固定组焦点处会聚,接着经过移动组平行于光轴出射。在 ω扫描视场中,移动组与固定组发生相对位移 Δ,成像光束会聚于固定组的焦平面上,通过移动组平行于光轴出射。相对位移 Δ与扫描视场 ω满足:

$$\omega = \arctan\left(\frac{\Delta}{f'_1}\right) \quad (1)$$

在实际的层叠微透镜阵列扫描成像系统中,当移动组的位移保持不变时,系统能够工作的视场范围称为凝视视场,一般层叠微透镜阵列扫描成像系统的凝视视场为 1°~2°,而扫描视场的变化范围要比凝视视场大很多。在层叠微透镜阵列扫描成像系统后方添加红外成像物镜,成像光束经过多个视场的扫描就得到较大扫描视场范围的图像,从而实现扩大红外系统成像范围的功能。

2.2 矢量波像差理论与非旋转对称系统的波像差

用于评价光学系统像差的指标/方法有很多,例如 Strehl 比、横向光线像差、点列图、调制传递函数(MTF)、波像差等。由于 Strehl 比、横向光线像差和均方根(RMS)波前差等都可以通过波像差得到,因此计算波像差对于光学系统的评价有着重要意义。

单元一一对应,且相对应的微透镜单元构成一个单元扫描系统。本研究所使用的单元扫描系统是基于开普勒式望远结构的,将此系统分为固定组和移动组,由移动组的移动实现视场扫描功能。具体的扫描工作原理如图 1 所示,其中左侧椭圆表示固定组的光学系统,右侧椭圆表示移动组的光学系统,虚线为系统的光轴。设固定组的焦距为 f'_1 ,移动组焦距为 $-f_2$ 。

由于单元扫描系统在扫描过程中存在相对位移,因此系统的像差是随着扫描过程不断变化的动态像差,无法利用旋转对称系统的像差理论来描述,而是需要建立非旋转对称系统的波像差理论。矢量像差理论^[17-19]可用来描述非旋转对称系统的波像差,该理论是由 Hopkins 的旋转对称光学系统的波像差理论发展而来。如今该理论已被广泛应用于离轴反射式系统的设计和装调^[20-28]。本研究利用非旋转对称系统的矢量像差理论来描述单元扫描系统的像差。

波像差是指从出瞳面到像面沿某条特定光线的理想成像参考球面与实际波前变形面之间的光程差。对于旋转对称光学系统,波像差函数 W 是关于归一化视场矢量 H 和归一化光瞳矢量 ρ 的函数。根据矢量波像差理论,矢量波像差展开式^[18]可以写为

$$W(H, \rho) = \sum_j \sum_{\rho=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (W_{klm})_j (H \cdot H)^\rho (\rho \cdot \rho)^n (H \cdot \rho)^m, \quad (2)$$

式中: j 表示光学系统的第 j 个表面,系统整体的波像差由每个表面的波像差结果求和得到; ρ, n, m 为从 0 到无穷大的整数; $(W_{klm})_j$ 为波像差系数, $k = 2\rho + m, l = 2n + m$ 。将波像差展开至初级像差的阶数(4 阶),得到

$$W(H, \rho) = W_{000} + W_{200}(H \cdot H) + W_{111}(H \cdot \rho) + W_{020}(\rho \cdot \rho) + W_{040}(\rho \cdot \rho)^2 + W_{131}(H \cdot \rho)(\rho \cdot \rho) + W_{222}(H \cdot \rho)^2 + W_{220}(H \cdot H)(\rho \cdot \rho) + W_{311}(H \cdot H)(H \cdot \rho) + W_{400}(H \cdot H)^2, \quad (3)$$

式中: W_{000}, W_{200} 和 W_{400} 表示均匀的波前滞后或超前,它们对像质没有影响; W_{020} 和 W_{111} 分别表示离焦量和放大倍率变化,一般用于轴向色差和垂轴色差的分析; $W_{040}, W_{131}, W_{222}, W_{220}, W_{311}$ 分别表示初级球差、彗差、

像散、场曲和畸变。

对于像散和场曲,由于二者都与视场的平方有关,因此常将他们放在一起考虑。当像散不为 0 时,场曲在子午和弧矢方向上的曲率是不同的;当像散为 0 时,

场曲在子午和弧矢方向的曲率一致,这时的场曲又称为 Petzval 场曲。为方便描述场曲, Hopkins 提出了中间场曲表面,这种描述方法对应的场曲波像差系数^[18]为

$$W_{220M} = W_{220} + \frac{1}{2} W_{222\circ} \quad (4)$$

根据式(4),将式(3)中像散和场曲对应的波像差展开项改写为

$$\frac{1}{2} W_{222} (H^2 \cdot \rho^2) + W_{220M} (H \cdot H) (\rho \cdot \rho) \quad (5)$$

对于每个表面的波像差系数,可通过赛德尔(Seidel)像差系数求得。需要注意的是,若表面是非球面,则计算 Seidel 像差系数时还需要计算非球面贡献。另外,式

$$W = \sum_j \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (W_{klm})_j [(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)]^p (\rho \cdot \rho)^n [(H - \sigma_j) \cdot \rho]^m, \quad (7)$$

式中: σ_j 为第 j 个表面的像差场偏移矢量。可以看到,式(7)相对于式(2),波像差系数和孔径矢量没有发生变化,只是在原有的归一化视场矢量上多出了矢量 σ_j ,

(3)中的矢量计算包括矢量点乘和矢量叉乘,矢量点乘比较常见,矢量叉乘的运算规则如式(6)所示。设两个矢量 $A = (A_x, A_y)$ 和 $B = (B_x, B_y)$,则它们的叉乘为

$$AB = (A_x B_y - A_y B_x, A_y B_x + A_x B_y) \quad (6)$$

由于系统在扫描过程中需要令两组微透镜发生相对位移,而单元扫描系统所构成的光学系统是一个非旋转对称光学系统,因此需要用非旋转对称光学系统的波像差展开式进行描述。非旋转对称光学系统的矢量波像差理论是由 Thompson^[18]在 20 世纪 70 年代基于 Buchroeder^[17]在含倾斜光学表面的非旋转对称光学系统的研究中提出的。当光学元件发生偏心或倾斜时,原光学系统变为非旋转对称光学系统,这时的矢量波像差展开式^[18]变为

所以光学表面发生偏心 and 倾斜仅引起视场变化。矢量 σ_j 的值则是根据每个表面的失调参数计算得到的,相关计算参数如图 2 所示。

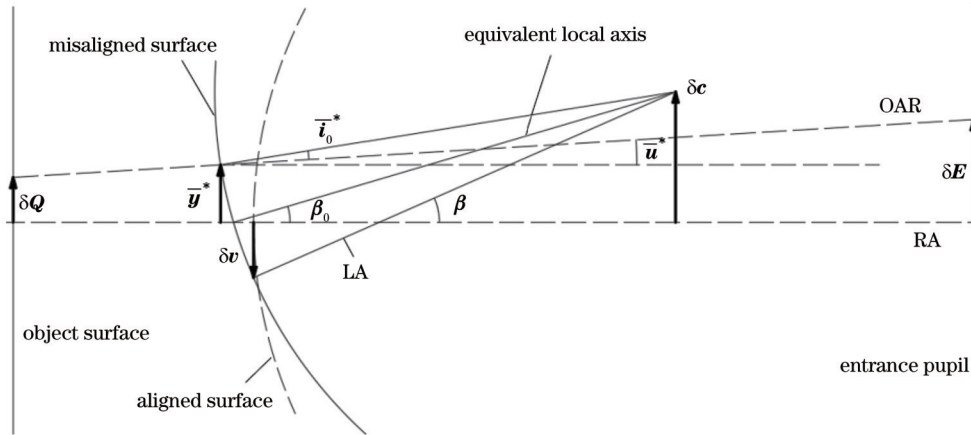


图 2 单个失调表面的像差场偏移矢量计算参数

Fig. 2 Calculation parameters of aberration field displacement vector of single misaligned surface

图 2 给出了单个表面倾斜偏心后的像差场偏移矢量计算参数。对于光学系统中的某一个失调表面,在原旋转对称系统的基础上引入了参考轴(RA)、局部轴(LA)以及光轴光线(OAR)等概念。其中,参考轴一般选为原旋转对称系统的光轴,局部轴为表面顶点到表面曲率中心的连线。非旋转对称光学系统的每个表面都存在对应的局部物像面和局部光瞳面,连接局部物面中心和局部入瞳中心的线被称为光轴光线,相比于旋转对称系统,非旋转对称系统的局部物像面中心和局部光瞳面中心存在一定的偏心量。

图 2 中:表面的局部物面中心和局部入瞳面中心相对于参考轴的偏移量分别用 δQ 和 δE 表示;表面在原旋转对称系统与光轴的交点称为顶点;表面经偏心倾斜后,顶点相对参考轴的偏移量为 δv ;曲率中心相

对参考轴的偏移量为 δc ;局部轴与参考轴组成的夹角为 β ,表面在非旋转对称系统中与参考轴的交点和曲率中心的连线称为等效局部轴,等效局部轴与参考轴的夹角即为等效倾斜参量 β_0 ;光轴光线与失调表面的交点相对于参考轴的偏移为 \bar{y}^* ,且该交点与曲率中心的连线和光轴光线间的夹角为 \bar{i}_0^* ,光轴光线与参考轴的夹角为 \bar{u}^* 。注意到上述参量均为矢量,每个矢量有两个方向的分量,说明能够将倾斜偏心扩展至二维。

设失调表面为第 j 个表面,等效倾斜参量的计算公式为

$$\beta_{0j} = \beta_j + c_j \delta v_j, \quad (8)$$

式中: c_j 为 j 表面的曲率。设表面在旋转对称系统中的局部物像高度分别为 \bar{y}_0 和 \bar{y}'_0 ,边缘光线在局部入出瞳

上的高度分别为 \bar{y}_E 和 \bar{y}'_E , 则局部物像面中心相对偏移量以及局部入瞳中心相对偏移量之间的关系为

$$\left(\frac{\delta Q'}{\bar{y}'_O}\right)_j = \left(\frac{\delta Q}{\bar{y}_O}\right)_j + \frac{y_j \Delta(n_j)}{\mathcal{K}} \beta_{Oj}, \quad (9)$$

$$\left(\frac{\delta E'}{\bar{y}'_E}\right)_j = \left(\frac{\delta E}{\bar{y}_E}\right)_j - \frac{\bar{y}_j \Delta(n_j)}{\mathcal{K}} \beta_{Oj}, \quad (10)$$

式中: y_j 和 \bar{y}_j 分别为边缘光线和主光线在表面上的高度; $\Delta(n_j)$ 为 j 表面的像方折射率与物方折射率的差值; \mathcal{K} 为拉格朗日不变量。 y_j, \bar{y}_j, n_j 以及 \mathcal{K} 均为原旋转对称光学系统中的参量。通过局部物面中心的相对偏移量和入瞳中心的相对偏移量, 可得到 \bar{u}_j^*, \bar{y}_j^* 以及 \bar{i}_{Oj}^* 的计算公式:

$$\bar{u}_j^* = \bar{u}_j \left(\frac{\delta Q}{\bar{y}_O}\right)_j + u_j \left(\frac{\delta E}{\bar{y}_E}\right)_j, \quad (11)$$

$$\bar{y}_j^* = \bar{y}_j \left(\frac{\delta Q}{\bar{y}_O}\right)_j + y_j \left(\frac{\delta E}{\bar{y}_E}\right)_j, \quad (12)$$

$$\bar{i}_{Oj}^* = (\bar{u}_j^* + c_j \bar{y}_j^*) - \beta_{Oj}, \quad (13)$$

式中: \bar{u}_j 为物方主光线与光轴夹角的正切值; u_j 为物方边缘光线与光轴夹角的正切值。最后得到像差场偏移矢量的球面贡献 σ_j 以及非球面贡献 σ_{Nj} , 其表达式为

$$\sigma_j = -\frac{\bar{i}_{Oj}^*}{\bar{i}_j}, \quad (14)$$

$$\sigma_{Nj} = \frac{\delta v_A - \bar{y}_j^*}{\bar{y}_j}, \quad (15)$$

式中: \bar{i}_j 为旋转对称系统的主光线在 j 表面处的入射角; δv_A 为非球面顶点的偏心量。对于球面贡献量, 当 $\bar{i}_j = 0$ 时, 光瞳在表面的曲率中心处, 这会造成光瞳偏移, 式(7)中还会多出一个光瞳偏移矢量; 对于非球面贡献量, 当 $\bar{y}_j = 0$ 时, 光瞳位于表面上, 同样会产生一个光瞳偏移矢量。本研究将单元扫描系统的光阑放置在固定组的第一个表面上, 即不讨论光瞳偏移的情况。

3 系统波像差的计算与分析

利用非旋转对称系统的矢量波像差表达式对一个两片式微透镜阵列单元扫描系统进行动态波像差分析, 系统的参数如表 1 所示。

表 1 单元扫描系统的系统参数^[9]

Table 1 System parameters of unit scanning system^[9]

Parameter	Value
Maximum scanning field of view / (°)	8
Gaze field of view / (°)	±1.06
$\lambda / \mu\text{m}$	1.064
Material	ZnS

将表 1 中系统选择的 5 个扫描视场作为分析对象, 扫描视场角度分别为 0°、3°、5°、7.07° 和 8°, 所选取的扫描视场角度与文献[9]一致, 每个扫描视场对应的透镜

间相对位移均不同, 如图 3 所示。

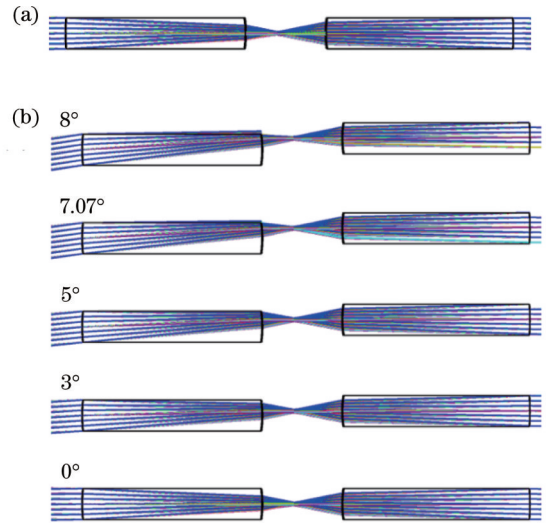


图 3 单元扫描系统在多个扫描视场下的光路结构。(a)原始结构; (b)多个扫描视场的结构

Fig. 3 Optical path structure of a unit scanning system under multiple scanning field of view. (a) Original structure; (b) structure of multiple scanning field of view

图 3(a)所示为旋转对称单元扫描系统的光路结构, 图 3(b)所示为单元扫描系统在 5 个扫描视场下的光路结构。其中, 0°扫描视场对应的光学系统是一个旋转对称光学系统, 其余 4 种扫描视场均为非旋转对称光学系统。将单元扫描系统的光阑设置在固定组的第一个表面上, 因此这个系统不会产生光瞳偏移矢量。计算层叠微透镜阵列单元扫描系统的动态波像差的基本思路如图 4 所示。

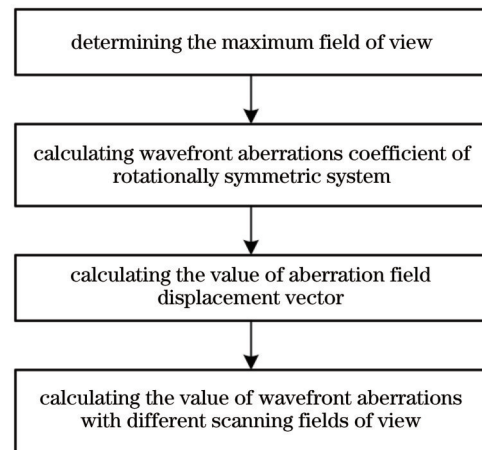


图 4 单元扫描系统动态波像差计算流程图

Fig. 4 Flow chart of dynamic wavefront aberrations calculation of unit scanning system

首先, 需要确定光学系统的最大视场。由于表面像差场偏移矢量最终的计算结果取决于该表面的偏心倾斜量和原旋转对称系统的光线追迹参数, 因此在获取光线追迹参数时, 为兼顾最大扫描视场, 需要将旋转

对称系统的视场角进行扩展。由最大扫描视场 8° 以及凝视视场 $\pm 1.06^\circ$, 可得到最大的视场角为 9.06° 。

其次, 在最大视场角确定后, 需要计算旋转对称系统的 Seidel 像差系数, 计算过程需要用到光线追迹参数, 采用 Zemax 软件的近轴光线追迹功能实现, 并通过 Seidel 像差系数与波像差系数的关系求出波像差系数。

然后, 需要计算出每个表面的像差场偏移矢量, 通过表面的偏心数据, 利用式 (8)~(15), 得到每个表面的像差场偏移矢量。需要注意的是, 像差场偏移矢量包括球面贡献和非球面贡献, 需要分别计算这两个偏移矢量, 再求和得到整体的像差场偏移矢量, 为此将式 (7) 改写为

$$W = \sum_j \sum_{\rho=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (W_{klm})_j [(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)]^\rho (\rho \cdot \rho)^n [(H - \sigma_j) \cdot \rho]^m + \sum_j \sum_{\rho=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (W_{klm})_{A,j} [(H - \sigma_{A_j}) \cdot (H - \sigma_{A_j})]^\rho (\rho \cdot \rho)^n [(H - \sigma_{A_j}) \cdot \rho]^m, \quad (16)$$

式中: $(W_{klm})_j$ 为波像差系数的球面贡献; $(W_{klm})_{A,j}$ 为波像差系数的非球面贡献。

最后, 需要根据式 (16) 得出不同扫描视场下单元扫描系统的波像差数值。在计算过程中令归一化孔径矢量的方向与归一化视场矢量的方向一致, 数值设

置为 1。

基于以上步骤, 即可计算出单元扫描系统的动态波像差。计算了表 1 中单元扫描系统的初级波像差。由于系统工作时存在凝视视场, 因此给出了不同扫描视场对应的凝视视场的像差, 最终结果如图 5 所示。

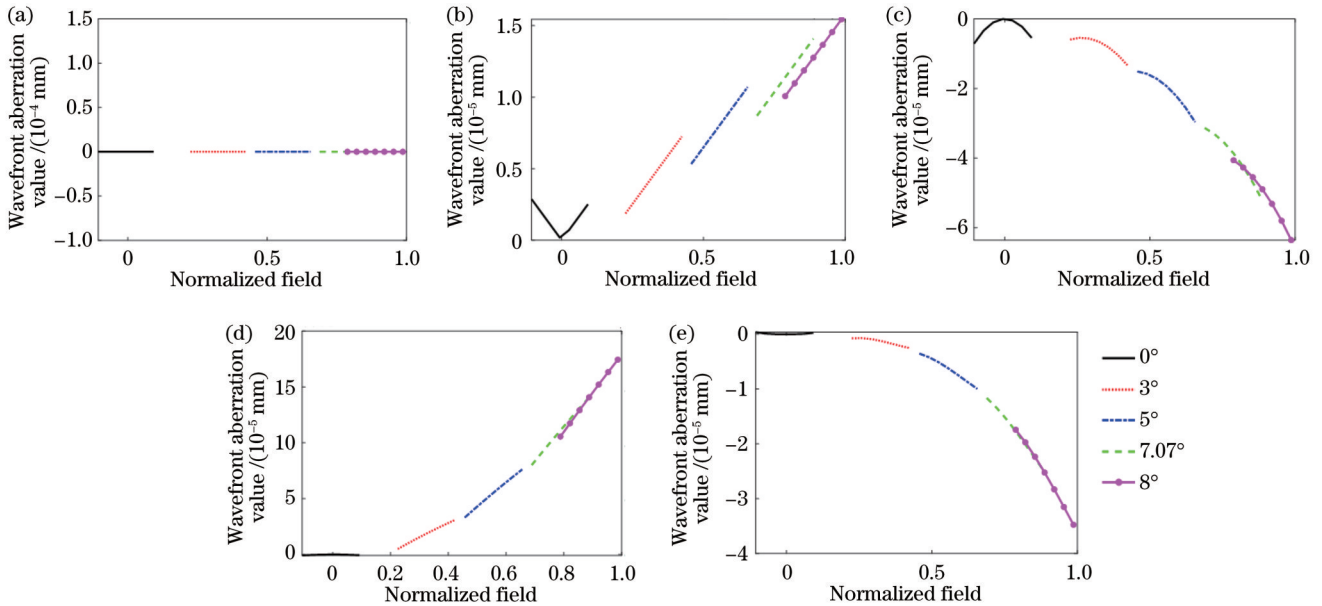


图 5 初级波像差随视场变化曲线。(a) 球差 (W_{040}); (b) 彗差 (W_{131}); (c) 像散 (W_{222}); (d) 场曲 (W_{220M}); (e) 畸变 (W_{311})

Fig. 5 Curves of primary wavefront aberrations with field of view. (a) Spherical (W_{040}); (b) coma (W_{131}); (c) astigmatism (W_{222}); (d) field curvature (W_{220M}); (e) distortion (W_{311})

在图 5 中, 由于球差与视场无关, 因此各扫描视场的球差值相同。彗差在 0° 扫描视场的凝视视场内, 曲线关于 0° 视场对称, 这是因为彗差是视场的一次方函数, 即彗差与视场呈线性关系, 当视场为负数时, 直线的斜率变为相反数。像散和场曲都是视场的二次方函数, 因此它们的曲线形状是抛物线的一部分。畸变是视场的三次方函数, 其曲线形状类似于三次函数的形状。随着扫描视场的增大, 除球差外的 4 类波像差值都逐渐远离零像差值, 说明单元扫描系统的初级波像差值会随扫描视场的增大而增大。

为有效描述系统的像差质量, 额外引入了评价像差大小的评价因子, 分别为初级波像差之和以及 RMS

波前差。其中初级波像差之和是式 (16) 所描述的求和形式。在已知波像差展开式的情况下, RMS 波前差 σ_w 可表示为

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W^2 \rho d\rho d\phi - \left(\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 W \rho d\rho d\phi \right)^2}, \quad (17)$$

式中: ρ 和 ϕ 分别为系统孔径的径向坐标以及角度坐标; W 为波像差展开式。式 (17) 适用于圆形孔径的光学系统, 本研究仅考虑层叠微透镜阵列在扫描过程中的像差变化规律, 而不讨论孔径形状造成的影响, 因此将系统的孔径形状设置为圆形来对 RMS 波前差进行计算。

初级波像差之和以及 RMS 波前差的计算结果如

图 6 所示。从图 6 可以看到,随着扫描视场的增大,初级波像差之和以及 RMS 波前差都增大。7.07° 视场与 8° 视场的凝视视场存在重叠,对于这个重叠视场区域,可以看到 8° 扫描视场对应的系统结构有着更小的初级

波像差之和以及 RMS 波前差,这说明在该重叠范围内 8° 视场对应的光学结构比 7.07° 视场对应的光学结构有着更好的性能,也说明系统已对较大扫描视场的像差进行校正。

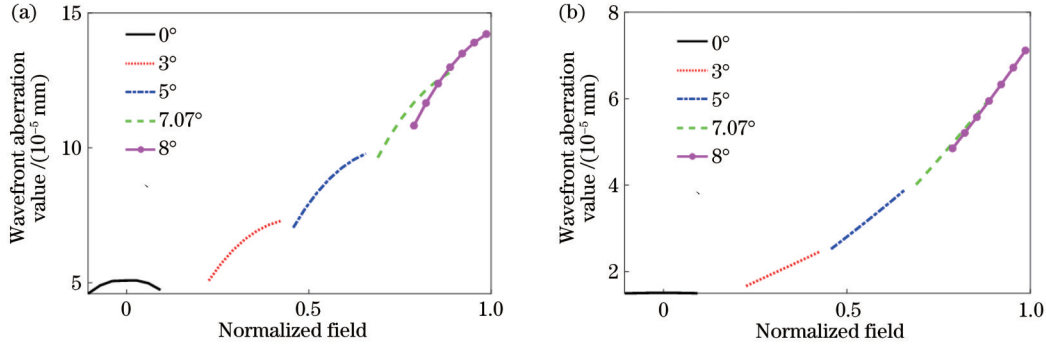


图 6 波像差评价因子随视场变化曲线。(a)初级波像差之和(W_{all});(b)RMS波前差(W_{RMS})

Fig. 6 Curves of wavefront aberrations evaluation factor with field of view. (a) Sum of primary wavefront aberrations (W_{all}); (b) RMS wavefront error (W_{RMS})

为定量判断系统综合像差,拟选取 0° 和 8° 扫描视场作为分析对象,即选取最小和最大的 RMS 波前差对应的中心视场。如图 6 所示,0° 和 8° 视场对应的 RMS 波前差值分别为 1.5×10^{-2} 、 $5.9 \times 10^{-2} \mu\text{m}$, 约为 0.014λ 和 0.055λ , 参考瑞利对像质大小的判断标准(即波像差小于 $\lambda/4$), 说明该系统的像质优良。为了验证所提计算方法的准确性, 利用 Zemax 软件获取 0° 和 8° 视场的 RMS 波前差, 结果分别为 0.042λ 和 0.011λ , 说明该结果与实际结果有一定的差距。这

主要是因为本文仅考虑了初级波像差,并未考虑高级波像差。

在旋转对称光学系统设计过程中,设计者常通过调控各光学表面的波像差系数来实现系统像差的校正。当系统中的某表面发生偏心时,由旋转对称系统的 Seidel 系数所求得的波像差系数并不能有效地反映该表面的实际波像差贡献。因此,依据上述计算方法,给出不同扫描视场下不同表面的波像差值以及系统整体的波像差值,如图 7 所示。

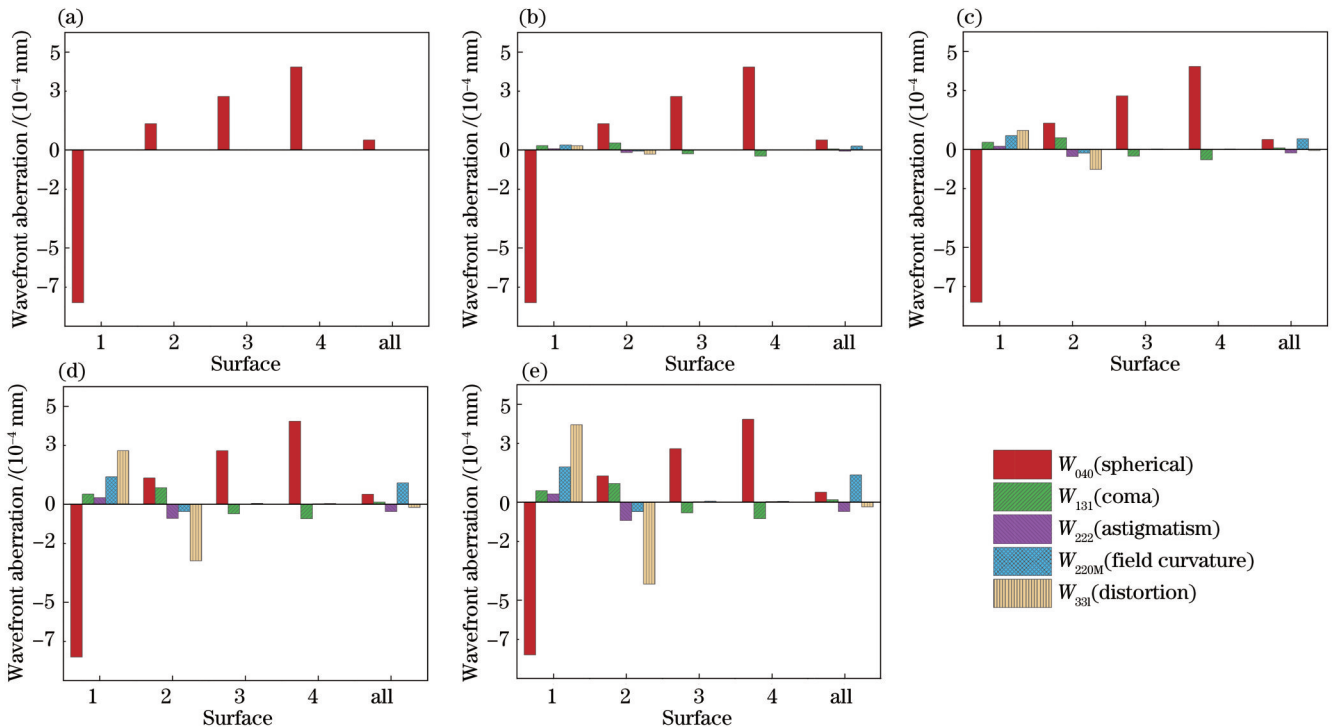


图 7 各扫描视场不同表面的初级波像差值。(a)0°;(b)3°;(c)5°;(d)7.07°;(e)8°

Fig. 7 Primary wavefront aberrations at different surfaces of each scanning field of view. (a) 0°; (b) 3°; (c) 5°; (d) 7.07°; (e) 8°

在图 7 中, 0° 扫描视场的归一化视场矢量和像差场偏移矢量的大小都为 0, 只有球差不为 0, 而其余 4 种像差均为 0。随着扫描视场的增大, 球差不变, 其余 4 种像差逐渐增大, 其中畸变的增长幅度最大, 而系统整体的波像差则始终保持较小的数值。另外, 此系统各表面上存在的像差主要为球差, 但系统整体的球差很小, 因此这个系统主要通过平衡各表面的球差来实现像差校正。

在设计单元扫描系统的过程中, 应利用所提的像差计算方法对各扫描视场的各类初级波像差进行调控, 降低不同扫描视场的动态像差, 从而在设计层面上提高系统成像质量。

4 结 论

红外光学系统具有抗干扰能力强等优点, 在军用和民用领域有着广泛的应用。红外系统的视场通常较小, 可采用层叠微透镜阵列扫描技术扩大红外系统的视场。一般来说, 层叠微透镜阵列结构在扫描过程中的动态像差会影响系统的成像质量, 因此对系统的动态像差进行深入研究对于实现大视场、高分辨率红外成像的像差控制和装调校正具有积极的意义。

通过引入非旋转对称光学系统的矢量波像差理论, 提出一种可用于层叠微透镜阵列扫描成像系统波像差计算的适用性方法, 并利用该方法实现了层叠微透镜阵列单元扫描系统的波像差计算。所提计算方法可用于层叠微透镜阵列扫描成像系统的设计中, 以便更高效地提升所设计系统的成像质量。由于仅考虑了初级波像差, 一些具有高阶非球面的系统中还可能引入较大的高阶像差, 因此仍需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Sui X B, Chen Q, Gu G H, et al. Infrared super-resolution imaging based on compressed sensing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 63: 119-124.
- [2] 刘琴. 基于微扫描的红外超分辨率成像技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2016.
Liu Q. Research on infrared super-resolution imaging technology based on micro-scanning[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [3] 曲艳玲. 红外凝视系统中的微扫描技术[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
Qu Y L. The technique of microscanning in the infrared staring systems[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [4] 袁影. 新概念超分辨率红外成像方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
Yuan Y. Research on new concept super-resolution infrared imaging method[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [5] Murphy R, Kohin M, Backer B S, et al. Recent developments in uncooled IR technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4028: 12-16.
- [6] 龚海梅, 刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 18-24.
Gong H M, Liu D F. Developments and trends in spaceborne infrared detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37

- (1): 18-24.
- [7] 杨旭. 用于光学相控阵的激光光束扫描技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Yang X. Laser beam scanning technique for optical phased arrays [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [8] Gibson J L, Duncan B D, Watson E A, et al. Wide-angle decentered lens beam steering for infrared countermeasures applications[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(10): 2312-2321.
- [9] 王瑶. 微透镜阵列在扫描光学系统中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Wang Y. Study on the application of microlens array in scanning optical system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [10] 殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702007.
Yin Z Y, Wang Y F, Jia W W, et al. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0702007.
- [11] 陈卉. 层叠微透镜阵列扫描成像系统的模拟仿真与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
Chen H. Simulation and experimental study on scanning imaging system of laminated microlens array[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [12] Watson E A. Analysis of beam steering with decentered microlens arrays[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(11): 2665-2670.
- [13] 董珊. 微透镜扫描器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Dong S. Research on microlens scanner[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [14] Akatay A, Urey H. Design and optimization of microlens array based high resolution beam steering system[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4523-4529.
- [15] 顾志远. 反射式望远镜失调校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
Gu Z Y. Misalignment corrections in reflective telescopes[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [16] Ge Z H, Liu Z Y, Huang Y H, et al. Analysis and design of a microlens array scanning system based on spherical aberration[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(1): 227-234.
- [17] Buchroeder R A. Tilted component optical systems[M]. Arizona: The University of Arizona, 1976.
- [18] Thompson K P. Aberration fields in tilted and decentered optical systems[M]. Arizona: The University of Arizona, 1980.
- [19] Thompson K P, Schmid T, Cakmakci O, et al. Real-ray-based method for locating individual surface aberration field centers in imaging optical systems without rotational symmetry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(6): 1503-1517.
- [20] Schmid T, Thompson K P, Rolland J P. A unique astigmatic nodal property in misaligned Ritchey-Chrétien telescopes with misalignment coma removed[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5282-5288.
- [21] Thompson K P, Schmid T, Rolland J P. The misalignment induced aberrations of TMA telescopes[J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 20345-20353.
- [22] Schmid T, Thompson K, Rolland J. Alignment induced aberration fields of next generation telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7068: 70680E.
- [23] 史广维. 基于矢量波像差理论的反射望远系统装调研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
Shi G W. Research on installation and adjustment of reflective telescope system based on vector wave aberration theory[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [24] Gu Z Y, Yan C X, Wang Y. Alignment of a three-mirror anastigmatic telescope using nodal aberration theory[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 25182-25201.

- [25] Ju G H, Yan C X, Gu Z Y, et al. Aberration fields of off-axis two-mirror astronomical telescopes induced by lateral misalignments[J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24665-24703.
- [26] Ju G H, Yan C X, Gu Z Y, et al. Nonrotationally symmetric aberrations of off-axis two-mirror astronomical telescopes induced by axial misalignments[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(6): 1399-1409.
- [27] Zhang X B, Zhang D, Xu S Y, et al. Active optical alignment of off-axis telescopes based on nodal aberration theory[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26392-26413.
- [28] Zhang X B, Xu S Y, Ma H C, et al. Optical compensation for the perturbed three mirror anastigmatic telescope based on nodal aberration theory[J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12867-12883.

Dynamic Aberrations of Scanning Imaging System with Cascaded Microlens Arrays

Pan Zhida¹, Su Xiaoqin¹, Zhou Yan², Mu Yu², Ji Jiarui¹, Yang Lei^{1*}, Xie Hongbo¹

¹Key Laboratory of the Ministry of Education on Optoelectronic Information Technology, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China

Abstract

Objective The limitations of infrared optical systems are mainly attributed to the performance of current practical detectors, which results in a typically narrow imaging field of view. However, employing a scanning imaging system with cascaded micro-lens arrays can extend the imaging field of view. Diffraction effects, beam crosstalk, and dynamic aberration generated during scanning are the principal factors affecting the image quality of the scanning imaging system with cascaded micro-lens arrays. Dynamic aberration is the aberration value of the system with various scanning stages. Our purpose is to study the dynamic aberration characteristics of the system. Building an appropriate theoretical model to describe dynamic aberrations is essential for the system design. Aberration can be applied to guide the system alignment due to the increasingly strict requirements for the alignment of cascaded micro-lens arrays. The distribution control of aberrations on individual optical surfaces is efficient in reducing the system tolerance. The tolerance range can be presented by calculating the aberrations with various scanning stages. Therefore, our study has theoretical and engineering significance in guiding the design optimization and alignment test of scanning imaging systems with cascaded micro-lens arrays.

Methods As the cascaded micro-lens arrays are displaced relative to each other during the scanning, the sub-unit of the scanning system becomes non-rotationally symmetric. The nodal wavefront aberration theory is adopted to describe the aberrations of such systems. Based on this theory, we build a dynamic wavefront aberration model for scanning imaging systems with cascaded micro-lens arrays and propose a method for calculating the wavefront aberrations of the systems. We then apply this model and calculation method to analyze a two-piece micro-lens arrays scanning model. We first examine the primary aberrations under multiple scanning fields of view and discuss how these primary aberrations vary with the scanning fields of view. Then, we calculate the root mean square(RMS) wavefront error of the system and analyze the relationship between the RMS wavefront error and the scanning field of view. When there is decentration on the system surface, the wavefront aberration coefficient of the rotationally symmetric system cannot effectively reflect the actual wavefront aberration contribution of the surface. Therefore, we provide the distribution of primary wavefront aberration values on the optical surface under different scanning fields of view.

Results and Discussions First, the variation of five primary wavefront aberrations with normalized fields of view is calculated (Fig. 5). Spherical aberration is not affected by the field of view to result in the same value for each scanning field of view. The relationship between the coma and the field of view is linear, with the coma slope of the coma being negative under the negative field of view. Astigmatism and field curvature are both the quadratic power functions of the field of view, and then their curved shapes are part of the parabola. Distortion is a cubic power function of the field of view, giving rise to its shape being that of a cubic function. The primary wavefront aberrations, except for spherical aberration, increase with the scanning fields of view. Subsequently, the sum of the primary wavefront aberrations and the RMS wavefront error of the system are calculated and analyzed (Fig. 6). It is evident that the sum of primary wavefront aberrations and RMS wavefront error rises with the scanning fields of view. The range of gaze field of view in different scanning fields overlaps, which reflects the aberration correction of the system for larger scanning fields of view. The

deviation between the calculated value of RMS wavefront error and the soft simulation results is discussed, along with the deviation causes. Finally, the primary wavefront aberration values of different surfaces of each scanning field of view are given (Fig. 7). It is observed that with the rising scanning fields of view, spherical aberration remains unchanged, while the other four types of aberrations increase gradually. Based on the quantitative relations of various types of aberrations, the system can achieve aberration correction by balancing spherical aberrations of each surface.

Conclusions The imaging quality of a system can be affected by dynamic aberrations of cascaded micro-lens arrays during the scanning. Therefore, studying the dynamic aberrations of the system is critical to high resolution and a large field of view in infrared imaging systems. We present an applicable method for calculating the wavefront aberration of scanning imaging systems with cascaded micro-lens arrays based on the nodal wavefront aberration theory of non-rotationally symmetric optical systems. We employ this method to calculate the wavefront aberrations of a cascaded micro-lens array scanning system, which effectively reflects the variability of primary aberrations with the scanning fields of view. The proposed method allows for quantitative aberration evaluation in a cascade micro-lens array scanning system. However, since only primary aberrations are considered in our paper, some high-order aberrations may be imported into the system with high-order aspheric surfaces. Thus, further research is essential.

Key words imaging system; infrared imaging; micro-lens array; scanning system; dynamic wavefront aberration; nodal aberration theory