

零彗差自由点条件下的失调光学系统波像差特性分析*

吴伟^{1,2}, 于乃辉³, 罗自荣¹, 白向娟¹, 尚建忠¹

(1. 国防科技大学智能科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

3. 中国人民解放军31636部队, 云南昆明 650300)

摘要:基于矢量像差理论,对反射式光学系统的一类特殊失调状态——满足零彗差自由点条件展开研究,分析了该特殊失调下三阶彗差和三阶像散的全视场波像差特性,建立了三阶像散双节点位置的解析计算公式,研究发现该类失调不会引入三阶彗差,并且会导致三阶像散的一个节点位于中心视场附近,揭示了当前传统装调方法中仅采用轴上彗差为零作为系统完善装调的弊端,并基于像差特性分析提出了一种仅根据轴上视场引入定量失调误差前后的像差变化来评估系统完善装调的方法。利用 CODE V (Version 10.2) 对两反式光学系统进行了仿真分析,结果表明文中建立的模型和方法可定量分析三阶像散双节点的位置及该类失调对系统波像差的影响规律,并验证了所提出系统完善装调方法的有效性。

关键词:零彗差自由点;像差分析;矢量像差理论;光学装调;失调光学系统

中图分类号:TH74 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2022)05-142-08



听语音
与作者互动
聊科研

Wave front aberration analysis for misaligned optical systems based on the coma-free pivot point

WU Wei^{1,2}, YU Naihui³, LUO Zirong¹, BAI Xiangjuan¹, SHANG Jianzhong¹

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. The PLA Unit 31636, Kunming 650300, China)

Abstract: Based on the nodal aberration theory, a special case of misalignments for reflective optical systems, which satisfying the condition of the coma-free pivot point, was studied. Under the effect of the special misalignments, the full field display aberration characteristics of the 3rd order coma and the 3rd order astigmatism were analyzed, and the analytical calculation formula of the two nodes position of the 3rd order astigmatism was established. It was found that the 3rd order coma would not change, and one node of the 3rd order astigmatism would locate near the central FOV (field of view), which revealed the drawback of using only coma-zero in axial FOV as the criterion of perfect alignment during the traditional optical assembly. Based on the analysis of wavefront aberration, a method to judge whether the system was aligned well according to the variance of wavefront aberration in only one axial FOV after introducing quantitative misalignments was proposed. A type of two-mirror optical system was adopted by CODE V (Version 10.2) to simulate the effect of misalignments on wavefront aberration, results show that the model and the method established can quantitatively analyze the two nodes position of the 3rd order astigmatism and verified the validity of the proposed judgement method for system assembly.

Keywords: coma-free pivot point; wavefront aberration analysis; nodal aberration theory; optical assembly; misaligned optical system

光学系统的成像质量不仅受到设计过程中残余像差的影响,还受到加工误差、装调误差、温变、振动等因素的综合影响。波像差作为光学检测过程中评价系统成像质量的一个重要指标,其特性直接反映了光学系统的工作性能^[1]。在光学系统的装调过程中,通过分析失调系统的波像差特性,可为评估实际的装调状态提供有效指导,众多

学者针对该领域进行了研究^[2-10]。Hopkins等^[2]建立了旋转对称光学系统的经典像差理论,揭开了光学系统波像差特性分析的帷幕;文献[3]回顾了矢量像差理论的发现历程,指出对于失调的光学系统,并没有增加新的波像差,只是系统的像差场特性发生了改变;Thompson^[4]在其博士论文中对这一特性进行了详细的介绍,基于矢量像差

* 收稿日期:2021-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675527)

作者简介:吴伟(1993—),男,湖南永州人,助理研究员,博士,E-mail:wuwei14@nudt.edu.cn;

尚建忠(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jz_shang_nudt@163.com

理论分析了偏心和倾斜两种失调误差引入的像差场特性:三阶彗差和三阶像散分别在全视场范围内存在一个和两个视场节点(零点),且节点的位置与失调状态直接相关。因此,对于失调的光学系统,轴上彗差和像散一般不为零,所以在光学系统的传统装调过程中,经常以轴上视场的三阶彗差是否为零作为系统是否完善装调的依据。但 Mcleod^[5]发现两反式光学系统中存在一个特殊的点,当次镜绕该点转动时,不引入额外的三阶彗差,揭示了传统装调评估方法的弊端,并指出还需检测轴外视场的像差才能准确评估系统的装配性能。随后, Schmid 等^[6]以 Ritchey-Chrétien 两反式光学系统(简称 RC 系统)为研究对象,基于矢量像差理论定性分析了该现象,指出该系统像散的一个节点会位于轴上视场附近。同期, Thompson^[7-8]将博士论文的研究成果重新总结并发表到期刊上,基于矢量像差理论分别分析了两反系统和三反系统在失调情况下的像差场特性,为失调状态计算提供了理论依据。庞志海等^[9-10]也基于矢量像差理论对两反和三反系统失调情况下的像差场特性进行了研究,指出由于零彗差自由点的存在,需要测量多个视场的波像差来确定系统的装调状态。徐少雄等^[11]通过分析同轴三反系统失调后的彗差变化特性,提出了一种通过次镜偏心补偿三镜失调引入像差的方法。徐春梅等^[12]则通过分析透镜横向失调对像差的影响,提出了一种考虑像差特性影响的失调校正方法。综上可知,对失调光学系统的像差特性分析是光学系统设计和装调过程中的重要环节,目前对常见失调的研究已经较为全面,但是对满足零彗差自由点这一特殊失调状态的研究还存在不足,大多停留在定性研究,缺乏理论解析模型的指导;此外,大多数研究虽然指出了要根据多视场的波像差才能判断系统是否完善装调,但是基于多视场的像差评估法无疑会增加人力物力,降低系统的装调效率,亟待更有效的评估方法。

因此,本文基于矢量像差理论,深入分析满足零彗差自由点这一特殊失调状态下光学系统的波像差特性,建立像散双节点位置的解析计算公式,量化分析该特殊失调对双节点位置的影响,并在此基础上寻求一种仅通过轴上视场的波像差评估系统是否完善装调的方法。由于失调主要引入三阶波像差,并且在装调过程中也主要根据三阶像散和三阶彗差评估系统的装调状态,因此本文主要针对这两部分波像差展开研究。

1 理论基础

1.1 矢量像差理论

20 世纪 80 年代以前,主要采用几何分析法^[13]分析装配误差对失调光学系统波像差特性的影响,直到文献[3]通过引入矢量乘法的概念,将 Hopkins^[2]建立的旋转轴对称光学系统波像差的标量形式改成矢量形式,从而建立起矢量像差理论,揭开了像差解析分析方法的序幕。随后, Thompson^[4,6-8]通过总结前人的工作,发现对于失调的光学系统,并没有增加新的像差类型,而是系统的像差场特性发生了改变,在视场矢量 \mathbf{H} 中应该引入额外的偏心向量 σ_j ,从而得到失调光学系统波像差的矢量形式,如式(1)所示,并将矢量像差理论推到新的高度,随后众多学者开始采用该理论进行失调计算和波像差特性分析。

$$\mathbf{W} = \sum_j \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} W_{klm,j} [(\mathbf{H} - \sigma_j) \cdot (\mathbf{H} - \sigma_j)]^p (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^n [(\mathbf{H} - \sigma_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]^m \quad (1)$$

式中: $k=2p+m$, $l=2n+m$; $\boldsymbol{\rho}$ 表示出瞳面上归一化的光瞳矢量; \mathbf{H} 表示像面上归一化的视场矢量; σ_j 表示第 j 个表面由于失调引入的视场偏心矢量,由 σ_j^{sph} 和 σ_j^{asph} 两部分组成,分别表示第 j 个表面上的球面基底和非球面基底由于失调引入的偏心矢量;三种矢量示意图如图 1 所示, $W_{klm,j}$ 表示第 j 个表面对应的像差贡献量系数,也由 $W_{klm,j}^{\text{sph}}$ 和 $W_{klm,j}^{\text{asph}}$ 组成,分别表示第 j 个表面上球面基底和非球面基底对应的像差贡献量系数。

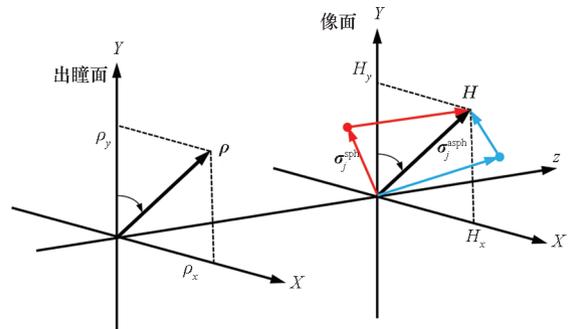


图1 光瞳矢量、视场矢量和视场偏心矢量示意图

Fig. 1 Conventions for the pupil vector, field vector and field decenter vector

对于失调的光学系统,其三阶彗差和三阶像散的矢量形式^[14]分别如式(2)和式(3)所示。

$$\mathbf{W}_{\text{coma}}^{3\text{rd}}(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}) = [(\mathbf{W}_{131}\mathbf{H} - \mathbf{A}_{131}) \cdot \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \quad (2)$$

$$\mathbf{W}_{\text{AST}}^{3\text{rd}}(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}) = \frac{1}{2} W_{222} [(\mathbf{H} - \mathbf{a}_{222})^2 + b_{222}^2] \cdot \boldsymbol{\rho}^2 \quad (3)$$

其中

$$W_{131} = \sum_j (W_{131,j}^{sph} + W_{131,j}^{asph}) \quad (4)$$

$$A_{131} = \sum_j (W_{131,j}^{sph} \sigma_j^{sph} + W_{131,j}^{asph} \sigma_j^{asph}) \quad (5)$$

$$W_{222} = \sum_j (W_{222,j}^{sph} + W_{222,j}^{asph}) \quad (6)$$

$$a_{222} = \frac{1}{W_{222}} \sum_j (W_{222,j}^{sph} \sigma_j^{sph} + W_{222,j}^{asph} \sigma_j^{asph}) \quad (7)$$

$$B_{222}^2 = \sum_j [W_{222,j}^{sph} (\sigma_j^{sph})^2 + W_{222,j}^{asph} (\sigma_j^{asph})^2] \quad (8)$$

$$b_{222}^2 = B_{222}^2 / W_{222} - a_{222}^2 \quad (9)$$

因此,对于三阶彗差和三阶像散未校正的系统,即 $W_{131} \neq 0, W_{222} \neq 0$,可推导其各自节点位置的计算公式,即

$$H_{131}^{zero} = \frac{A_{131}}{W_{131}} \quad (10)$$

$$H_{222}^{zero} = a_{222} \pm ib_{222} \quad (11)$$

其中, A_{131}, a_{222} 和 b_{222} 与失调误差直接相关,因此节点位置也受到失调误差的影响。综上,针对三阶彗差和三阶像散是否被校正的光学系统,总结其在存在失调和不存在失调时的全视场像差场特性,如表 1 所示。

表 1 光学系统的全视场像差场特性

Tab. 1 Full field display aberration characteristics of optical systems

类别	不存在失调	存在失调
$W_{131} \neq 0$	三阶彗差与视场呈线性关系,具有 1 个节点,位于中心视场;	三阶彗差与视场呈线性关系,具有 1 个节点,偏离中心视场;
$W_{222} \neq 0$	三阶像散与视场成二次关系,但只有 1 个节点,位于中心视场	三阶像散与视场成二次关系,具有 2 个节点,双节点偏离中心视场
$W_{131} = 0$	三阶彗差恒为零;	三阶彗差为恒定常数;
$W_{222} \neq 0$	三阶像散与视场成二次关系,但只有 1 个节点,且位于中心视场	三阶像散与视场成二次关系,具有 2 个节点,双节点偏离中心视场
$W_{131} \neq 0$	三阶彗差与视场呈线性关系,具有 1 个节点,位于中心视场;	三阶彗差与视场呈线性关系,具有 1 个节点,偏离中心视场;
$W_{222} = 0$	三阶像散恒定为零	三阶像散与视场呈线性关系,具有 1 个节点,偏离中心视场
$W_{131} = 0$	三阶彗差恒为零;	三阶彗差为恒定常数;
$W_{222} = 0$	三阶像散恒为零	三阶像散与视场呈线性关系,具有 1 个节点,偏离中心视场

根据表 1 可以得出以下四点规律:

1) 对于三阶彗差未校正的系统,三阶彗差与视场呈线性关系,在全视场范围内只有 1 个视场节点,并且节点的位置与失调状态有关,不存在失调时,节点位于中心视场。

2) 对于三阶彗差校正的系统,三阶彗差在全视场范围内为恒定常数,不存在失调时,该常数为零。

3) 对于三阶像散未校正的系统,三阶像散与视场成二次关系,且最多只有 2 个节点。存在失调时,具有双节点特性,节点位置与失调状态有关,不存在失调时,双节点位置重合,则只体现出 1 个节点,位于中心视场。

4) 对于三阶像散校正的系统,存在失调状态时,三阶像散与视场呈线性关系,存在一个与失调状态相关的节点,不存在失调时,三阶像散在全视场范围内恒为零。

1.2 零彗差自由点

根据式(2)可以看出,对于失调的光学系统,存在一类特殊的失调状态,即当失调误差使得 $A_{131} = 0$ 时,由失调引入的三阶彗差恒等于零,此时失调系统的三阶彗差场特性与不存在失调时的情况一致。

对于光阑位于主镜的两反式光学系统,以主镜作为基准,对次镜进行装调,只有次镜存在失调误差。通过求解式(5)即可得到这类特殊的失调状态应满足的条件,即

$$\sigma_{sm}^{asph} / \sigma_{sm}^{sph} = -W_{131,sm}^{sph} / W_{131,sm}^{asph} \quad (12)$$

根据文献[14]中偏心矢量的计算公式,将其代入式(12),进而可以求解得到次镜的失调误差应满足如下公式:

$$\begin{bmatrix} X_{DE} \\ Y_{DE} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} B_{DE} \\ -A_{DE} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中

$$m = \frac{d_1 r_{sm} W_{131,sm}^{sph}}{d_1 W_{131,sm} + r_{sm} W_{131,sm}^{asph}} \quad (14)$$

式中, X_{DE} 和 Y_{DE} 分别表示次镜沿 X, Y 轴的偏心误差, A_{DE} 和 B_{DE} 分别表示次镜沿 X, Y 轴的倾斜误差, d_1 表示主次镜之间的间隔, r_{sm} 表示次镜的曲率半径。

对于确定的两反式光学系统,可知比例系数 m 是唯一确定的,因此,次镜偏心和倾斜的失调状态组合可以转化为次镜绕某点的转动,即对两反式光学系统,存在一个固定的点,当次镜绕该点转动时,其失调状态引入的偏心矢量始终满足

式(12),则该失调引入的三阶彗差恒等于零,该固定点即为零彗差自由点,如图2所示,该点与次镜顶点之间的距离即为 m ,如式(14)所示。

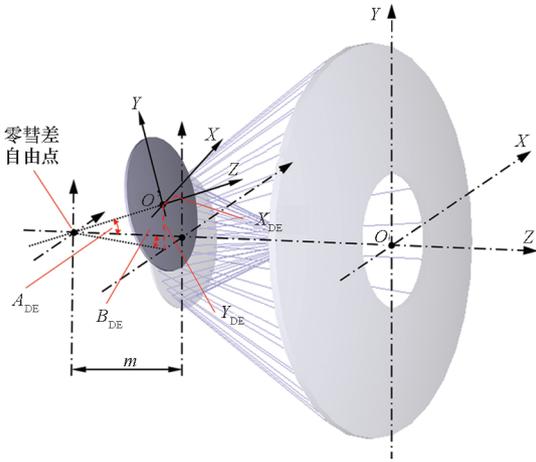


图2 零彗差自由点示意

Fig.2 Conventions for the coma-free pivot point

综上所述,对于两反式光学系统,存在一类特殊的失调状态,当失调满足绕零彗差自由点转动的条件时,即使失调没有校正,轴上视场的三阶彗差仍然为零。因此,传统装调过程中仅靠轴上视场彗差是否为零来判断系统是否完善装调是不充分的。

此外,对于多反式光学系统,当每个镜片的失调状态都满足式(15)时,可知即使系统还存在失调,也不会引入三阶彗差,每个镜片都存在着一个零彗差自由点。

$$\sigma_j^{\text{asph}} / \sigma_j^{\text{sph}} = -W_{131,j}^{\text{sph}} / W_{131,j}^{\text{asph}} \quad (15)$$

两反式光学系统是目前天文观测、空间遥感的重要结构形式,为该类光学系统装调过程中提供有效指导,以解决实际装调过程中由于零彗差自由点的存在导致单视场像差难以评估系统完善装调状态的问题,下面对该类特殊失调状态下的波像差特性展开深入分析。

2 零彗差自由点对系统波像差特性的影响分析

2.1 三阶彗差特性分析

当存在的失调使镜片满足绕零彗差自由点转动时,根据式(2)、式(4)、式(5)和式(12),推导出系统三阶彗差的计算公式为:

$$W_{\text{coma}}^{3\text{rd}}(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}) = W_{131} \mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \quad (16)$$

此时,失调系统的三阶彗差场特性与完善装调时完全一样,且彗差在设计之初是否因被校正而呈现全视场内恒定为零或者与视场呈线性关系的特性,因此无法仅根据三阶彗差的状态评估系

统是否存在失调误差。

2.2 三阶像散特性分析

根据矢量乘法法则^[7],联立式(6)~(9),可以得到:

$$\frac{(B_{222}^2 / W_{222})}{a_{222}^2} = \frac{1 + t_1^2 t_2}{(1 - t_1 t_2)^2} \cdot \frac{W_{222}}{W_{222,\text{sm}}^{\text{sph}}} \quad (17)$$

式中: $t_1 = W_{131,\text{sm}}^{\text{sph}} / W_{131,\text{sm}}^{\text{asph}}$, $t_2 = W_{222,\text{sm}}^{\text{asph}} / W_{222,\text{sm}}^{\text{sph}}$; $W_{131,\text{sm}}^{\text{sph}}$ 、 $W_{131,\text{sm}}^{\text{asph}}$ 分别表示次镜球面基底对应的三阶彗差和三阶像散的贡献量系数, $W_{222,\text{sm}}^{\text{sph}}$ 、 $W_{222,\text{sm}}^{\text{asph}}$ 分别表示非球面基底对应的三阶彗差和三阶像散的贡献量系数,其值可通过文献[14]和文献[15]中的解析公式计算得到,也可通过 CODE V (Version 10.2) 光学设计软件分析得到。

文献[6]直接对比了 B_{222}^2 和 a_{222}^2 的大小是不合理的,它忽视了三阶像散系数 W_{222} 的影响,通过式(17)可以直接计算 (B_{222}^2 / W_{222}) 与 a_{222}^2 之间的比值大小,该比值是小于1的,令

$$t = \frac{B_{222}^2 / W_{222}}{a_{222}^2} \quad (18)$$

进而根据式(3)、式(9)和式(11)推导得到该特殊失调情况下三阶像散双节点位置的解析计算公式为:

$$\mathbf{H} = (1 \pm \sqrt{1-t}) \mathbf{a}_{222} \quad (19)$$

不同两反系统的设计参数不同,计算得到的 t 值也不同,根据式(18)可以定量分析三阶像散的双节点位置,下面结合具体的光学系统进行分析。

3 实际案例分析

3.1 RC系统的波像差特性分析

本节以 RC 系统^[14]为例,分析基于零彗差自由点失调情况下的像差场特性。该系统的光学设计参数如表2所示,系统口径为3 m, F 数为20,全视场为 $\pm 0.12^\circ$,计算主、次镜三阶彗差和三阶像散的系数如表3所示。从表3可以看出,该系统在设计阶段校正了三阶彗差,其主、次镜的三阶彗差系数之和为零,由表1可知,该系统完善装调情况下三阶彗差在全视场范围内恒为零。

表2 RC系统的设计参数

Tab.2 Design parameters of the RC optical system

表面	非球面系数	曲率半径/mm	厚度/mm	半口径/mm
主镜	-1.002 12	-11 214.953	-5 000	1 500
次镜	-1.481 18	-1 340.206	6 499.984	165

表 3 RC 系统的波像差系数

Tab. 3 Wavefront coefficients of the RC optical system

类型	$W_{131}(\lambda)$	$W_{222}(\lambda)$
主镜球面基底	-88.120	1.391
主镜非球面基底	0	0
次镜球面基底	45.119	-3.057
次镜非球面基底	43.693	2.816
总和	0	1.150

注: λ 为 632.8 nm。

根据表 3 和式 (18) 计算得到 $t = 0.00175$, 将其代入式 (19) 计算得到该特殊失调情况下三阶像散的双节点位置 $(0, 2a_{222})$ 。

显然, 一个节点位于零点, 另一个节点的位置则与具体的失调状态有关。下面根据零彗差自由点条件设置三组不同的失调状态组合 (如表 4 所示), 对其波像差进行仿真分析。

表 4 引入的三组失调状态组合情况

Tab. 4 Three cases of introduced misalignments

失调状态	X_{DE}/mm	Y_{DE}/mm	$A_{DE}/(^{\circ})$	$B_{DE}/(^{\circ})$
失调状态 1	0	0	0	0
失调状态 2	0	0.420	0.04	0
失调状态 3	0.420	0.420	0.04	-0.04

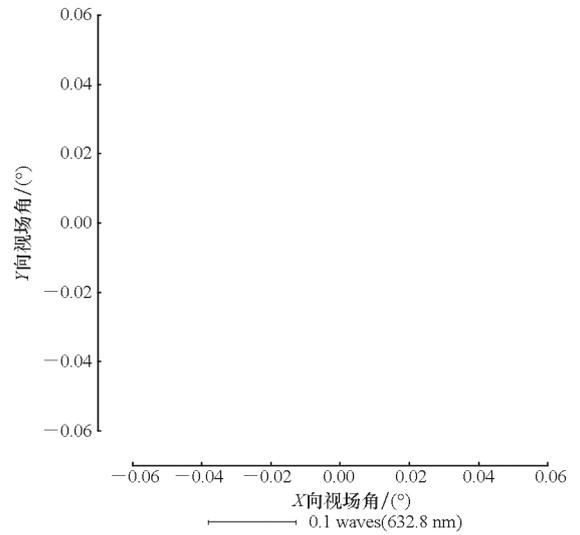
基于 CODE V 对该 RC 系统进行建模, 并通过像差全视场分析功能 (full-field-display, FFD) 分析表 4 中三组失调状态下的三阶像差特性, 如图 3 所示。

根据图 3, 对于该 RC 系统, 分析其在存在满足零彗差自由点这一特殊失调状态时的像差场特性, 可以得到以下规律:

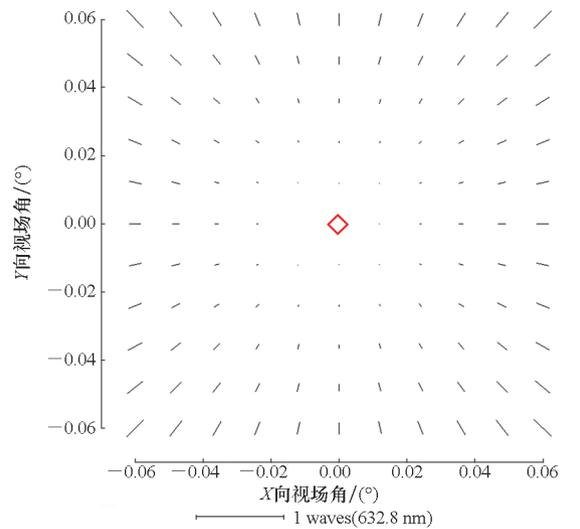
1) 与 2.1 小节的理论分析一致, 该特殊失调情况下三阶彗差的全视场分布与完善装调时的情况完全一样, 如图 3(a)、图 3(c)、图 3(e) 所示。

2) 对于三阶像散的双节点特性, 当完善装调时, 双节点重合, 位于中心视场, 如图 3(b) 所示; 而存在失调时, 一个节点仍然位于中心视场, 另外一个节点偏离中心视场, 且其位置与失调状态直接相关, 如图 3(d)、图 3(f) 所示。

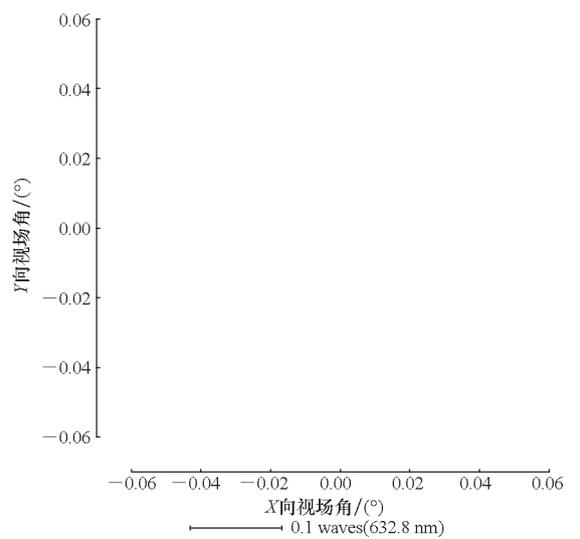
3) 对三阶像散, 存在失调时, 虽然中心视场的像差依然为零, 但是可以看出不同失调状态的像散在全视场的分布特性是不同的, 这也是为什么部分文献^[5,8-10]中提到, 由于零彗差自由点的存



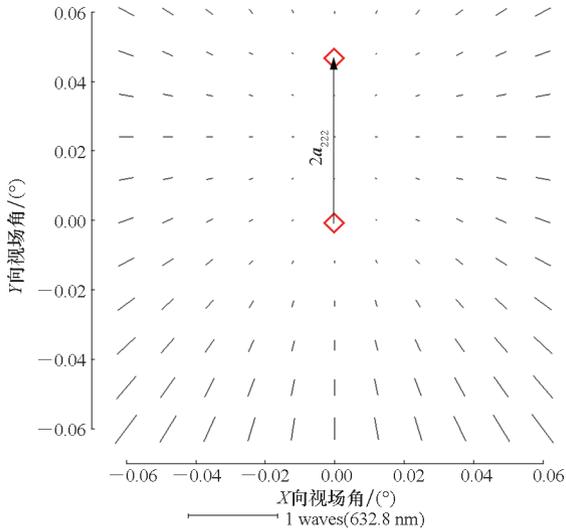
(a) 彗差 (失调状态 1)
(a) Coma (misalignment case 1)



(b) 像散 (失调状态 1)
(b) Astigmatism (misalignment case 1)

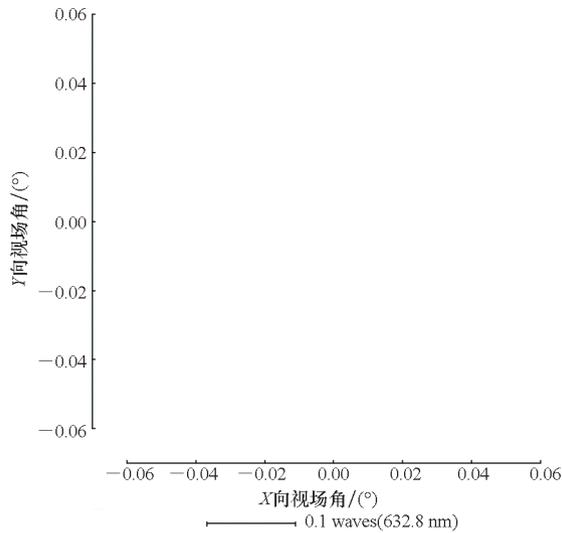


(c) 彗差 (失调状态 2)
(c) Coma (misalignment case 2)



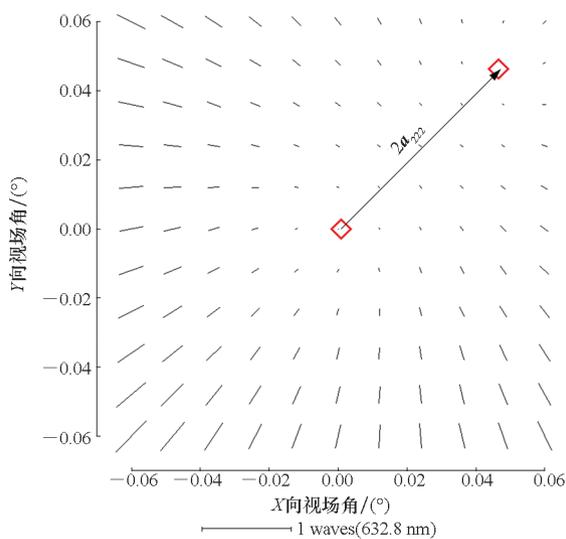
(d) 像散 (失调状态 2)

(d) Astigmatism (misalignment case 2)



(e) 彗差 (失调状态 3)

(e) Coma (misalignment case 3)



(f) 像散 (失调状态 3)

(f) Astigmatism (misalignment case 3)

图 3 RC 系统的三阶像差全视场分布

Fig. 3 FFD of the 3rd order aberration for the RC system

在,仅仅通过轴上视场评估系统完善装调是不充分的,还需要检测轴外或边缘视场的像差。然而在实际像差检测过程中,实现轴外多视场需要耗费较大的成本和较长的时间,因此,亟待一种高效的装调状态评估方法。

3.2 两反系统完善装调的轴上视场像差评估法

评估光学系统是否完善装调的本质在于获取系统当前的装配误差,而对于两反系统,在光学检测过程中,三阶彗差和三阶像散由四项泽尼克系数表征,正好可以计算出四个侧向失调误差($X_{DE}/Y_{DE}/A_{DE}/B_{DE}$),但由于零彗差自由点的存在,导致在该类误差求解的过程中,存在满足特殊失调状态的奇点,因此部分学者通过获取额外视场下的波像差来增加方程约束,从而提高失调状态的计算精度。

随着柔性高精密切持机构^[16]的出现,使得光学系统的装调朝着自动化、智能化的方向发展。在大型望远镜的建造过程中,为了补偿重力、振动、温度、冲击等因素引入的形变对系统像质的影响,也设计有精密六维调整机构,以通过调整次镜位姿进行补偿校正,如 VST 望远镜^[17]、TMT 望远镜^[18]、HST 望远镜^[19]等。

因此,在两反系统的装调过程中,通过高精度装调机构实现镜片位姿的精确调整是切实可行的,也是未来智能制造的发展趋势。基于此,本文提出一种仅基于轴上视场像差的装配性能评估方法,具体的操作步骤为:当两反系统轴上视场的三阶彗差和三阶像散都为零时,借助精密装调机构对失调参数(一般选择偏心误差)引入特定的失调量,通过评价指标(merit index, EI,如式(20)所示)计算引入失调前后轴上视场的像差变化,从而评估系统的失调状态,如图 4 所示。

$$EI = \sum_{i=1}^M \sum_{j=5}^8 |C_j^u - C_j^v| \quad (20)$$

式中, C_j^u 和 C_j^v 分别表示完善装调和当前状态下的波像差系数, M 表示引入定量失调状态的数量,图 4 中为 3。

还是以 RC 系统为例,当轴上视场的三阶彗差和三阶像散都为零时,先不管当前失调状态的具体值,假设当前的失调误差为表 4 中三组状态中的一种,直接对次镜再引入 Y 向 1 mm 的偏心误差,通过 CODE V 仿真三组状态引入失调前后轴上视场的像差结果,并计算评价指标 EI 值,如表 5 所示。

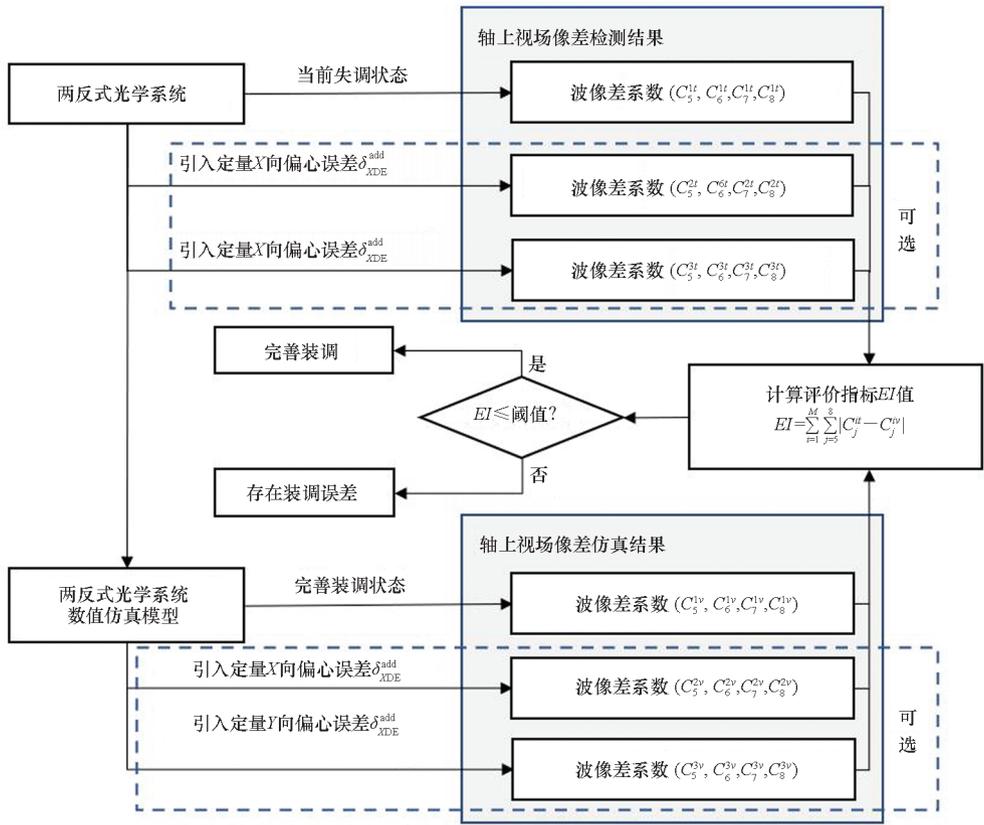


图 4 基于轴上视场像差的装调状态评估法

Fig. 4 Method of assembly condition assessment based on the aberrations in axial FOV

表 5 引入定量失调前后的波像差及评价指标

Tab. 5 Wavefront aberration and EI before and after introducing a determined misalignment

失调状态	$C_5(\lambda)$	$C_6(\lambda)$	$C_7(\lambda)$	$C_8(\lambda)$	$EI(\lambda)$
失调状态 1	0	0	0	0	0
失调状态 1 + 1mm Y_{DE}	-0.004	0	0	-2.470	
失调状态 2	0	0	0	0	0.02
失调状态 2 + 1mm Y_{DE}	-0.024	0	0	-2.470	
失调状态 3	0	0	0	0	0.04
失调状态 3 + 1mm Y_{DE}	-0.024	0.020	0	-2.470	

由表 5 可以看出,虽然三组失调状态的初始像差都为零,但是在引入 1 mm Y 向偏心误差后,三组状态的像散都发生了变化,并且存在明显的差异,从失调状态 1 到状态 3,原始误差越大,预置一定失调后引入的像散也越大,这是因为失调误差对三阶像散的影响存在耦合性^[20]。根据表 5 中的 EI 值可知,只有状态 1 是完善装调的,因

此,在轴上三阶彗差和三阶像散为零的情况下,通过引入确定的失调量,并根据引入失调前后的像差数值变化来评估初始的失调状态是切实可行的。

4 结论

基于矢量像差理论,总结了失调光学系统中三阶彗差和三阶像散的全视场波像差特性:三阶彗差与视场呈线性关系,在全视场范围内只有 1 个节点,三阶像散与视场成二次关系,在全视场范围内存在 2 个节点;并在此基础上重点对一类特殊的失调情况——满足零彗差自由点条件的失调状态进行了深入研究,建立了该特殊失调下像散双节点位置的解析计算公式。研究表明,该特殊失调不引入三阶彗差,并且会使像散的一个节点位于中心视场附近,揭示了装调过程中不能仅基于轴上视场三阶彗差为零作为系统完善装调的标志,并基于波像差特性的分析结果,提出了一种基于轴上视场引入定量失调前后的波像差变化来评估系统完善装调的方法。以 RC 系统为研究对象,通过仿真验证了所建立解析计算公式和完善装调评估方法的可行性。本文对于理解反射式光

学系统在失调状态下(特别是满足零彗差自由点条件)的波像差特性和提高反射式光学系统的装调效率具有重要意义。现有试验条件无法实现失调量的精确定量调节,但是文中的理论分析和仿真结果已经验证了所提方法的有效性,下一步将基于现有的一套76 mm口径的同轴两反系统,研制一套面向精密装配的试验平台,从试验上探究该方法的可行性,并研究基于单视场波像差的装配误差计算方法。

参考文献(References)

- [1] D. 马拉卡拉. 光学车间检测[M]. 杨力, 伍凡, 等译. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
MALACARA D. Optical shop testing[M]. Translated by YANG L, WU F, et al. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2012. (in Chinese)
- [2] HOPKINS H H. Wave theory of aberrations[M]. New York: Oxford University Press, 1950.
- [3] ROLLAND J P, BAUER A M, FUERSCHBACH K H, et al. Roland V. Shack's discovery of nodal aberration theory, the expansion into the aberrations of freeform optics, and impact in optical design[C]// Proceedings of Roland V. Shack Memorial Session: A Celebration of One of the Great Teachers of Optical Aberration Theory, 2020.
- [4] THOMPSON K P. Aberration fields in tilted and decentered optical systems[D]. Arizona: University of Arizona, 1980.
- [5] MCLEOD B A. Collimation of fast wide-field telescopes[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1996, 108: 217.
- [6] 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.
- [7] THOMPSON K. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(7): 1389.
- [8] THOMPSON K P, SCHMID T, ROLLAND J P. The misalignment induced aberrations of TMA telescopes[J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20345-20353.
- [9] 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.
PANG Z H, FAN X W, CHEN Q F, et al. Misalignment induced aberration characteristic of TMA optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 653-657. (in Chinese)
- [10] 庞志海, 樊学武, 马臻, 等. 失调卡塞格林光学系统像差特性的研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 195-200.
PANG Z H, FAN X W, MA Z, et al. Misalignment induced aberration characteristic of Cassegrain telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 195-200. (in Chinese)
- [11] 徐少雄, 陈长征, 张星祥, 等. 失调同轴三反消像散系统消彗差补偿[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 201-209.
XU S X, CHEN C Z, ZHANG X X, et al. Coma-free compensation in perturbed on-axis three-mirror anastigmatic system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 201-209. (in Chinese)
- [12] 徐春梅, 刘秉琦, 黄富瑜, 等. 基于像差特性分析的光学系统横向失调校正方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 287-291.
XU C M, LIU B Q, HUANG F Y, et al. Correction method for lateral displacement optical system based on the analysis of aberration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 287-291. (in Chinese)
- [13] RIMMER M. Analysis of perturbed lens systems[J]. Applied Optics, 1970, 9(3): 533.
- [14] 顾志远. 反射式望远镜失调校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(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: Chinese Academy of Science, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2016. (in Chinese)
- [15] 赵楠. 失调反射系统的矢量像差理论实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
ZHAO N. Experiment investigation of nodal aberration theory in misaligned reflective system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [16] 马立, 荣伟彬, 孙立宁, 等. 面向光学精密装配的微操作机器人[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 280-287.
MA L, RONG W B, SUN L N, et al. Micro operation robot for optical precise assembly[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 280-287. (in Chinese)
- [17] GRADO A, CAPPELLARO E, COVINO S, et al. Search for the optical counterpart of the GW170814 gravitational wave event with the VLT survey telescope[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 492(2): 1731-1754.
- [18] ANCHE R M, SEN A K, ANUPAMA G C, et al. Analysis of polarization introduced due to the telescope optics of the thirty meter telescope[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2018, 4(1): 018003.
- [19] CODER R D, WETTERER C J, HAMADA K M, et al. Inferring active control mode of the Hubble space telescope using unresolved imagery[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2018, 41(1): 164-176.
- [20] GU Z Y, WANG Y, JU G H, et al. Computation of misalignment and primary mirror astigmatism figure error of two-mirror telescopes[J]. Journal of Astronomical Telescopes Instruments & Systems, 2018, 4(1): 019002.