

失调卡塞格林光学系统像差特性的研究

庞志海^{1,2}, 樊学武¹, 马 臻¹, 陈钦芳¹, 邹刚毅^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学研究室, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 以矢量波像差理论为基础, 对卡塞格林光学系统的失调像差特性进行分析, 通过分析发现失调的卡塞格林系统不会引入新的像差, 只是会导致三阶像差在像面上的分布发生变化, 球差在全视场内为常量, 彗差零点不再位于视场中心, 像散在视场内存在两个零点且不再关于中心视场对称。在校正失调产生轴上彗差的情况下, 卡塞格林系统的一个像散零点位于轴上视场, 轴上视场的像差接近于零, 但是边缘视场的像散依然较大, 因此在卡塞格林系统的装调过程中, 需要测量多个视场的波像差来确定系统的装调状态。利用 CODE V 对失调卡塞格林系统的像差在视场上的分布进行仿真, 结果表明利用矢量波像差理论可以对失调卡塞格林系统的像差进行定性分析, 以提高卡塞格林系统的装调效率。

关键词: 矢量波像差; 光学装调; 失调量; 像差; 卡塞格林光学系统

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0195-06

Misalignment induced aberration characteristic of Cassegrain telescope

Pang Zhihai^{1,2}, Fan Xuewu¹, Ma Zhen¹, Chen Qinfang¹, Zou Gangyi^{1,2}

(1. Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China;

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

Abstract: Based on the vector wavefront aberration theory, the misalignment induced aberration's characteristic of Cassegrain optical system was analyzed in this paper. It is shown that a misaligned Cassegrain has three residual 3rd aberrations. The 3rd order spherical aberration is constant over the field and the 3rd order coma increases linearly with the field but the zero coma point no longer locates at the field center. Moreover, the astigmatism aberration field in system without symmetric contains two zero astigmatism point, neither of which is necessarily located on the field center of view. It has been demonstrated that a Cassegrain under assembly is only measured to have perfect performance on-axis but not aligned in any significant way, so the measurements of multiple field points for the Cassegrain are required in the process of alignment.

Key words: vector wavefront aberration theory; optical assembly; misalignment; aberration; Cassegrain optical system

收稿日期: 2013-05-05; 修订日期: 2013-06-03

基金项目: 国家“863”资助项目(Y112G81800); 青年科学与基金(Y111B6150Z); 西部之光(Y129341213)

作者简介: 庞志海(1985-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计、检测与装调等方面的研究。Email: uestc_pzh@126.com

导师简介: 樊学武(1972-), 男, 博士, 主要从事光学系统设计、光学检测装调等方面的研究。

0 引言

反射光学系统^[1-2]可以实现大口径、宽视场、宽谱段、易于轻量化等优点,被广泛的应用于民用航空、航天领域。反射光学系统的最终成像质量不仅受系统设计时的剩余像差影响,而且还受系统制造、装调水平等因素的制约。在光学系统的装调过程中,光学元件失调(偏心、倾斜等)使光学系统不再旋转对称,传统的共轴光学像差理论不能用于失调光学系统的像差分析。而传统光学系统装调是以轴上视场是否引入彗差作为判断系统失调的依据,该方法不能对失调系统的像差特性做出分析,而且仅仅分析轴上视场,并不能保证全视场的成像质量。因此,引入计算机辅助装调^[2-5]技术来指导此类光学系统的装调过程。目前计算机辅助装调技术主要采用灵敏度矩阵法来指导光学系统的装调,该方法是假设光学元件的失调量变化和引起系统像差变化量在很小的范围内近似为线性关系,仅从数值分析的角度来求解出光学系统的失调量,而不能对光学系统的失调时像差的各种特性进行分析。

文中以矢量波像差理论为基础,对卡塞格林光学系统存在失调时的初级像差(球差、彗差、像散)特性进行分析,阐述了光学系统在装调过程中不能将轴上视场零像差作为系统完成装调判据的理由,并利用光学设计软件 CODE V 对失调的卡塞格林系统像差特性进行仿真分析。结果表明对于装调过程中的卡塞格林光学系统,次镜失调不会产生新的像差,装调过程中系统像差依然由球差、彗差、像散组成,但是系统不同像差在视场内的分布形式将会改变。

1 失调卡塞格林系统的矢量波像差

利用矢量波像差理论^[5-12]表示轴对称卡塞格林系统的初级波像差:

$$W = \sum_j^{\text{spherical}} W_{040}(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_j^{\text{coma}} W_{131j}(\vec{H} \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \frac{1}{2} \sum_j^{\text{Astigmatism}} W_{222j}(\vec{H} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_j^{\text{Field curvature}} W_{220j}(\vec{H} \cdot \vec{H})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \sum_j^{\text{Distortion}} W_{331j}(\vec{H} \cdot \vec{H})(\vec{H} \cdot \vec{\rho}) \quad (1)$$

式中: \vec{H} 、 $\vec{\rho}$ 为视场向量和光瞳向量(见图 1); j 表示光学系统中光学元件的表面数; W_{040} 、 W_{131} 、 W_{222} 、 W_{220} 、 W_{311} 分别代表系统各光学元件表面的球差、彗差、像散、场曲和畸变系数。

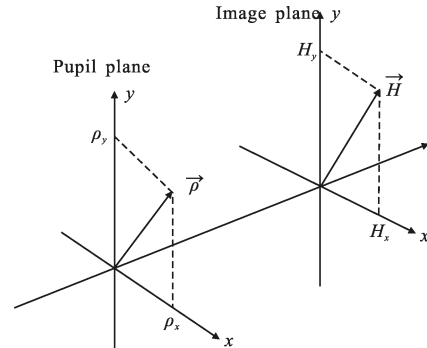


图 1 视场向量 \vec{H} 和光瞳向量 $\vec{\rho}$ 示意图

Fig.1 Conventions for field vector \vec{H} and pupil vector $\vec{\rho}$

当卡塞格林系统存在失调时,引入向量 $\vec{\sigma}_j$ 来表示光学系统第 j 表面的像差中心与理想状态时的偏离量, \vec{H}_{Aj} 表示失调光学系统视场向量,如图 2 所示。

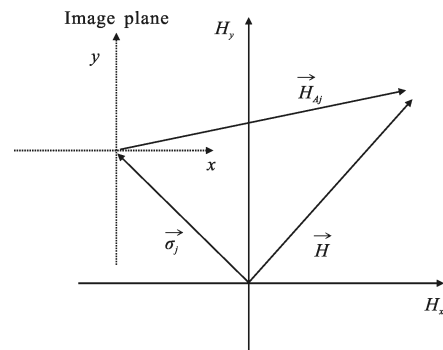


图 2 视场向量示意图

Fig.2 Representation of the effective field vector

仅考虑系统初级像差中的球差、彗差、像散,则失调卡塞格林系统的波像差表达式如下($\vec{H}_{Aj} = \vec{H} - \vec{\sigma}_j$):

$$W = \sum_j^{\text{spherical}} W_{040}(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_j^{\text{coma}} W_{131j}(\vec{H}_{Aj} \cdot \vec{\rho})(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \frac{1}{2} \sum_j^{\text{Astigmatism}} W_{222j}(\vec{H}_{Aj} \cdot \vec{\rho})^2 = \sum_j W_{040}(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_j W_{131j}[(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}][(\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j}[(\vec{H} - \vec{\sigma}_j)^2 \cdot \vec{\rho}^2] \quad (2)$$

由上式可知对于失调卡塞格林系统来说,光学元件失调不会产生新的像差,其像差形式依然为球差、彗差、像散,但是失调系统的像差中心有所偏移,

参考文献[6]定义了上式中的向量乘法则。

2 失调卡塞格林系统的像差特性

利用如图 3 所示卡塞格林光学系统对其失调像差特性进行分析,系统参数如表 1 所示,并利用光学设计软件 CODE V 的像差全视场分布(Full-Field-Display, FFD)选项分别对理想、失调卡塞格林系统的初级球差、初级彗差、初级像散在全视场(归一化)内的量值、方向的分布进行显示。

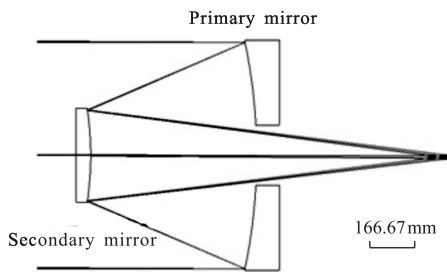


图 3 卡塞格林系统示意图

Fig.3 Schematic layout of Cassegrain optical system

表 1 卡塞格林系统光学参数

Tab.1 Parameter of Cassegrain

Surface	R	d	K
Primary mirror (STOP)	-1 811.99	-547.8	-1.000
Secondary mirror	-1 026.36	1 186.02	-3.473 8

2.1 理想卡塞格林系统像差特性分析

公式(1)中理想轴对称卡塞格林系统的球差为:

$$W = \sum_j W_{040j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 \quad (3)$$

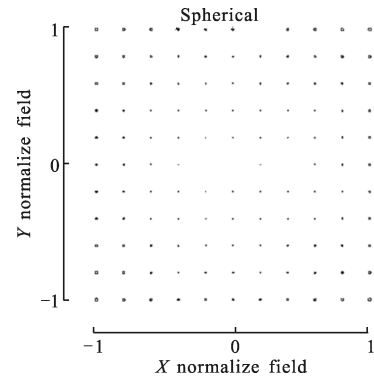
卡塞格林系统在设计时校正了球差 ($\sum_j W_{040j}$),

而球差与视场向量 \vec{H} 无关, 因此理想卡塞格林系统的球差在全视场内为零(图 4(a))。

理想系统的彗差和像散为:

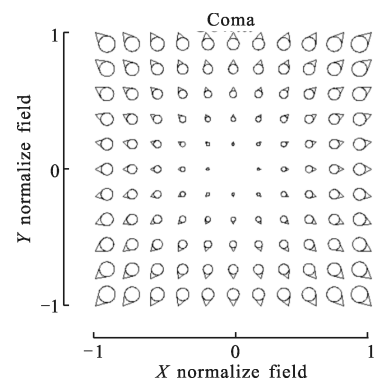
$$W = \sum_j W_{131j} (\vec{H} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} (\vec{H} \cdot \vec{\rho})^2 \quad (4)$$

由于理想轴对称卡塞格林系统在设计时未校正彗差 ($\sum_j W_{131j} \neq 0$)、像散 ($\sum_j W_{222j} \neq 0$), 彗差与视场向量 \vec{H} 成线性关系, 而像散与视场向量 \vec{H} 成平方关系。中心视场 ($\vec{H} = \vec{0}$) 的彗差和像散为零并随着视场的增加线性和平方增加(图 4(b)、(c))。



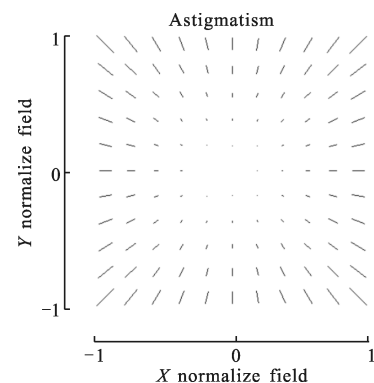
(a) 球差

(a) Spherical aberration



(b) 彗差

(b) Coma



(c) 像散

(c) Astigmatism of Cassegrain optical system

图 4 理想卡塞格林系统像差全视场示意图

Fig.4 Full-field-display aberrations of ideal Cassegrain

2.2 失调卡塞格林系统像差特性分析

在卡塞格林系统的装调过程中, 由于主镜口径较大不易调节, 因此将主镜作为系统装调的参考面。给定次镜任意失调量, 利用光学设计软件 CODE V 的像差全视场分布选项分别对失调卡塞格林系统的初级球差、初级彗差、初级像散在视场内的量值、方

向进行显示(见图 5)。

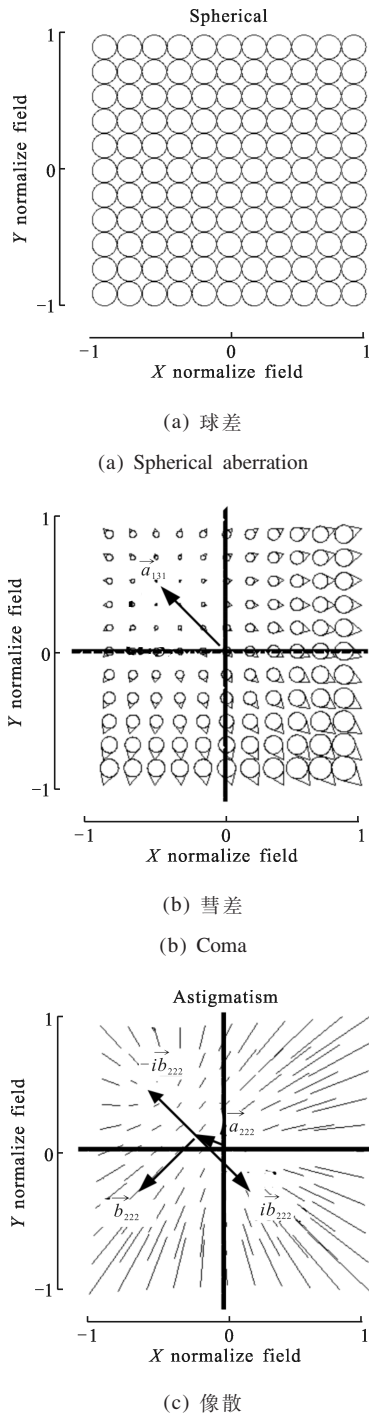


图 5 失调卡塞格林系统像差全视场示意图

Fig.5 Full-field-display aberrations of misaligned Cassegrain optical system

球差主要是由各光学元件间的间隔误差引起的^[10]与视场无关,在全视场内为常数。即失调卡塞格林系统的球差项表达式与理想系统相同但是

($\sum_j W_{040j} \neq 0$), 失调卡塞格林系统的球差在全视场内为常数(图 5(a))。

失调卡塞格林系统的彗差由公式(2)可知为:

$$W = \sum_j W_{131j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) =$$

$$\underbrace{(\sum W_{131j} \vec{H} \cdot \vec{\rho})}_{\text{Normal system}} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) - \underbrace{(\sum W_{131j} \vec{\sigma}_j \cdot \vec{\rho})}_{\text{Misalignment}} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (5)$$

失调系统的彗差可以写为两部分:第一部分为系统设计时的剩余彗差,与视场呈线性关系,第二部分为失调引入的失调彗差。失调引入的彗差与视场向量无关,即表明失调彗差在全视场内为常量。分别定义为:

$$\begin{cases} \sum W_{131j} \vec{H} = W_{131} \vec{H} \\ \vec{A}_{131} = \sum W_{131j} \vec{\sigma}_j \\ \vec{a}_{131} = \vec{A}_{131} / W_{131} \end{cases} \quad (6)$$

将公式(6)带入公式(5)中并化简,失调卡塞格林系统的彗差可简写为:

$$W = W_{131} [(\vec{H} - \vec{a}_{131}) \cdot \vec{\rho}] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (7)$$

令上式为零可以获得失调卡塞格林系统的彗差零点为 $\vec{H} = \vec{a}_{131}$ (图 5(b)),且彗差以此点为对称中心逐渐线性增加。

失调卡塞格林系统的像散由公式(2)可以写为:

$$W = \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j)^2 \cdot \vec{\rho}^2] = \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} \vec{H}^2 \cdot \vec{\rho}^2 -$$

$$\underbrace{\vec{H} (\sum W_{222j} \vec{\sigma}_j \cdot \vec{\rho}^2)}_{\text{Linear}} + \frac{1}{2} \underbrace{\sum W_{222j} \vec{\sigma}_j^2 \cdot \vec{\rho}^2}_{\text{Constant}} \quad (8)$$

失调系统的像散可以分为两部分:第一部分与视场成平方关系,为系统设计时的剩余像散,第二部分为次镜失调引入的失调像散。失调引入的像散分为与视场有关的线性像散和常数项像散。与彗差类似定义:

$$\begin{cases} \vec{A}_{222} = \sum W_{222j} \vec{\sigma}_j \\ \vec{B}_{222}^2 = \sum W_{222j} \vec{\sigma}_j^2 \\ \vec{a}_{222} = \vec{A}_{222} / W_{222} \\ \vec{b}_{222}^2 = \vec{B}_{222}^2 / W_{222} - \vec{a}_{222}^2 \end{cases} \quad (9)$$

利用上式可将失调系统的像散简写为:

$$W = \frac{1}{2} W_{222} [(\vec{H} - \vec{a}_{222})^2 + \vec{b}_{222}^2] \cdot \vec{\rho}^2 \quad (10)$$

令上式为零来求解^[6,11]失调系统的像散零点可知:

$$(\vec{H}-\vec{a}_{222})^2+\vec{b}_{222}^2=0 \tag{11}$$

$$\vec{H}=\vec{a}_{222}\pm i\vec{b}_{222} \tag{12}$$

失调卡塞格林系统的像散失去了对称性,在视场内产生两个像散零点(图5(c)).

3 卡塞格林系统装调特性分析

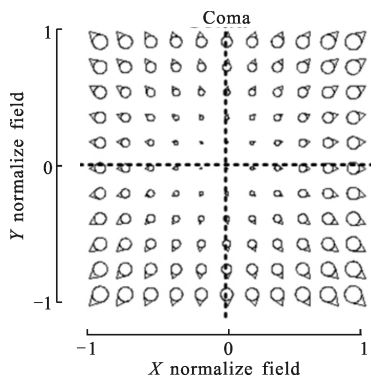
球差是由于各光学元件的间隔误差引起,而光学元件的偏心与倾斜主要引入彗差、像散。轴上视场彗差是光学系统存在失调的一个重要标志^[8]。通过文中分析可知对于失调卡塞格林系统,另一个失调的标志是失对称的双零点像散。如果调节系统中次镜偏心或倾斜来校正失调引入的常数项彗差,参考文献[11]指出对于孔径光阑位于主镜上的两反射镜光学系统在校正了轴上彗差之后存在着 $\vec{B}_{222}^2 \ll \vec{a}_{222}^2$,因此由公式(9)可以得到:

$$\vec{b}_{222}^2 \cong -\vec{a}_{222}^2 \tag{13}$$

则在校正了轴上彗差之后系统的像散零点为:

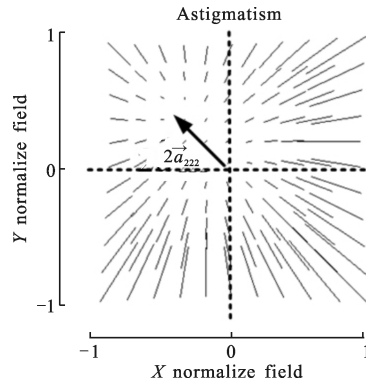
$$\vec{H}=\vec{a}_{222}\pm\vec{a}_{222}\cong 0, 2\vec{a}_{222} \tag{14}$$

在校正了轴上彗差之后(图 6(a)),失调卡塞格林系统中像散的一个零点位于视场中心(图 6(b)),将会使得失调光学系统的轴上没有像差(轴上的彗差、像散均为零),但边缘视场像散较大。因此不能仅仅依靠中心视场的波像差水平来确定系统的装配状态,在卡塞格林系统的装配过程中需要测量多个视场的波像差来确定系统是否完成装调。



(a) 彗差

(a) Coma



(b) 像散

(b) Astigmatism

图 6 校正轴上彗差后卡塞格林系统像差全视场示意图
Fig.6 Full-field-display aberrations of misaligned Cassegrain optical system with axis coma removed

4 结论

文中以矢量波像差理论为基础,经理论推导得出了卡塞格林光学系统在装调过程中的像差特性:系统失调时不会产生新的像差,其初级像差依然为球差、彗差、像散,元件失调仅仅改变了像差分布形式;元件失调产生的球差在全视场内为常数;元件失调产生的彗差在全视场内为常数(方向、量值),失调的常数彗差与系统的设计剩余彗差组合使得彗差的零点不再位于中心视场;不同于球差与彗差,失调产生与视场有关的线性像散和常数项像散,而且失调使得像散存在两个零点。在卡塞格林系统的装调过程中,不能仅依靠轴上点的波像差不能作为系统装调完成的依据,而应该测量边缘多个视场的波像差保证系统的装调质量。文中对于理解失调卡塞格林系统的像差特性和提高卡塞格林系统的装调效率具有重大的参考意义。

参考文献:

[1] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese)
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 706-709.

[2] Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lv Baobin. Design of new-style unobscured three-mirror optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1144-1147. (in Chinese)
郭永祥, 李英才, 吕保斌. 一种新型无遮拦三反射光学系

- 统研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1144–1147.
- [3] Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei. Study on computer-aided alignment method[C]//SPIE, 2005, 5638: 674–681.
- [4] Kim Yunjong, Yang Ho-Soon, Kim Sugwhan, et al. Alignment of off-axis optical system with multi mirrors using derivative of zernike polynomial coefficient [C]//SPIE 2009, 7433: 74330C1–74330C8.
- [5] Zhang Bin, Hang Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 54–58. (in Chinese)
张斌, 韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 54–58.
- [6] Thompson K P. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22(7): 1389–1401.
- [7] Rogers J R. Techniques and tools for obtaining symmetrical performance from tilted-component systems [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(7): 1776–1787.
- [8] Shark R V, Thompson K P. Influence of alignment error of a telescope system on its aberration field [C]//SPIE, 1980, 251: 146–153.
- [9] Schmid T, Thompson K P, Rolland J P. Alignment induced aberration fields of next generation telescopes [C]//SPIE, 2008, 7068: 70680E1–70680E7.
- [10] Schmid T, Thompson K P, Rolland J P. Misalignment-induced nodal aberration fields in two-mirror astronomical telescopes [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(16): D131–D144.
- [11] Schmid T, Thompson K P, Rolland J P. A unique astigmatic nodal property in misaligned Ritchey-Chrétien telescopes with misalignment coma removed [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5282–5288.
- [12] Schmid T, Rolland J P, Rakich A, et al. Separation of the effects of astigmatic figure error from misalignments using nodal aberration theory (NAT)[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 17433–17477.