

文章编号: 1005-5630(2008)01-0050-05

## 卡塞格林系统计算机辅助装调技术研究\*

王 彬<sup>1,2</sup>, 蒋世磊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 较全面地介绍了计算机辅助装调的基本原理及方法。利用 Zemax 针对卡塞格林系统进行了失调仿真分析, 并且利用 Matlab 讨论分析像差与各装调参量之间的对应关系及该系统的失调特性。根据以上分析, 最后确定了卡塞格林系统的装调方案。为了验证方案的可行性, 在 Zemax 中为卡塞格林系统人为的加入不同的失调量后, 按照确定的装调方案利用建立的计算机辅助装调数学模型计算出失调量的大小和方向, 再根据计算结果对系统进行调整, 仿真结果表明方案是可行的, 对卡塞格林系统装调工作有较好指导作用。

**关键词:** 卡塞格林系统; 计算机辅助装调; 失调量; 灵敏度矩阵; Zernike 多项式系数

**中图分类号:** TP 39

**文献标识码:** A

### Study on computer-aided alignment method of Cassegrain system

WANG Bin<sup>1,2</sup>, JIANG Shilei<sup>1,2</sup>

(1. The Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The basic principle and method of computer-aided alignment is introduced. The misalignment state of Cassegrain system is simulated in Zemax, the corresponding relationship between the misalignments and Zernike polynomial coefficients is analyzed and the misalignment characteristic of Cassegrain system is summarized by means of Matlab. Finally, the alignment scheme is determined by the above analysis. In order to verify the alignment scheme, the Cassegrain system is aligned according to the value which is calculated in accordance with the alignment scheme. The result demonstrates that the alignment scheme is feasible and guidable to the alignment of Cassegrain system.

**Key words:** Cassegrain system; computer-aided alignment; misalignment; sensitivity matrix; Zernike polynomial coefficient

## 1 引 言

随着光学表面加工技术及光学设计能力的迅速发展,对光学系统的成像质量要求越来越高。传统的装调方法装调时间长且很难达到所需的精度要求,采用计算机辅助装调技术,能够确保足够的装调精度。光学系统的计算机辅助装调技术,是通过计算机对实时检测结果与理论结果进行对比分析,通过必需的数学模型处理,预测系统中零件的失调方位和量值以指导实际装调。

\* 收稿日期: 2007-04-06

作者简介: 王 彬(1979-),男,江西吉安人,硕士研究生,主要从事光学装调方面的研究。

卡塞格林系统以简单的光学结构实现大口径光学系统的多种功能,随着非球面加工检测技术的进步,该系统越来越广泛地应用于大中型光学成像或扩束系统。卡塞格林系统结构虽然简单,但装调精度要求较高,实现高精度的装配要求,是保证整体系统光学成像质量的关键。

## 2 计算机辅助装调数学模型<sup>[1~3]</sup>

当光学系统存在失调量时,将会产生像差,它们之间有函数关系:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $F_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 为系统的像差,  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为各元件位置结构参量。  $f_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 代表像差与镜面位置之间的函数关系。利用泰勒公式对  $F_j$  进行展开,并只取其一次项,则失调量与系统成像质量之间的函数关系近似用线性方程表示:

$$F_j = F_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n}(x_n - x_{0n}) \quad (2)$$

式(2)中  $F_{0j}$  为系统设计时残留的像差值,  $x_{0i}$  为原始系统各镜面的设计位置结构参量,  $F_j$  为像差的当前测量值。  $\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f_j}{\partial x_n}\right)$  为像差对各个位置参量的一阶偏导数。用函数值相对各个结构参量的微商  $\left(\frac{\delta f_j}{\delta x_1} \dots \frac{\delta f_j}{\delta x_n}\right)$  来近似地代替这些微商  $\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1} \dots \frac{\partial f_j}{\partial x_n}\right)$ , 可以得到像差与位置结构参量变化之间的近似线性方程组:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \Delta x_n \\ \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了简单,用矩阵形式来表示上述方程组,可设:

$$\Delta F = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - F_{01} \\ \vdots \\ F_m - F_{0m} \end{bmatrix}, \quad \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ \vdots \\ x_m - x_{0m} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1}, \dots, \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1}, \dots, \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{bmatrix}$$

则式(3)可写成为:

$$A \Delta X = \Delta F \quad (4)$$

式(4)就是计算机辅助装调技术的数学模型,它是建立在像差与位置结构参量成线性关系以及可以叠加的假设基础上的。式中  $A$  为灵敏度矩阵,  $\Delta X = X - X_0$  为系统中各片镜面需要调整的变化量,即失调量,通常包括沿垂直于光轴方向的移动量、转动量及各镜面之间的轴向间隔。  $\Delta F = F - F_0$  为各校正对象的实测值与光学设计值之差,也就是系统成像质量随失调量的变化值,在文中采用 Zernike 多项式系数  $Z_5$ 、 $Z_6$ 、 $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_9$  作为系统成像质量评价标准。采用原因有以下两点:

(a) Zernike 多项式各阶系数与相应波像差成正比关系。

(b)  $Z_5$ 、 $Z_6$ 、 $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_9$  代表光学系统的各种初级像差( $Z_5$ :  $0^\circ$  或  $90^\circ$  像散,  $Z_6$ :  $45^\circ$  像散,  $Z_7$ :  $X$  方向彗差,  $Z_8$ :  $Y$  方向彗差,  $Z_9$ : 球差),且主要是由位置失调而引起的。

## 3 被装校卡塞格林系统光路图<sup>[4]</sup>

系统光路如图1所示。系统焦距为3000mm。抛物面主镜口径为150mm,曲率半径为577.9mm。双

曲面副镜曲率半径为 64.1mm,圆锥系数为 1.472。主镜与次镜的间距为 260mm。调整时主镜固定不动,只调次镜,这是因为:

- (a) 通过利用 Zemax 模拟失调分析,波像差相对次镜的位置结构参量具有较高灵敏度。
- (b) 次镜的调整比较方便及准确。

所以系统有五个需要调整参量:主镜与次镜之间的空气间隔( $TTHI$ )、次镜  $X$  方向的偏心( $TEDX$ )、次镜  $Y$  方向的偏心( $TEDY$ )、次镜  $X$  方向的倾斜( $TETX$ )、次镜  $Y$  方向的倾斜( $TETY$ )。 $TTHI$ 、 $TEDX$ 、 $TEDY$  的单位为 mm,  $TETX$ 、 $TETY$  的单位为( $^{\circ}$ )。

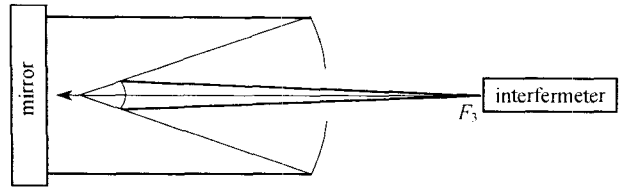


图 1 卡塞格林系统计算机辅助装校光路图  
Fig. 1 Ray path of computer-aided alignment of Cassegrain system

#### 4 卡塞格林系统失调特性分析

利用 Zemax 对卡塞格林系统进行了失调状态模拟,为了兼顾轴外点成像质量,分别对系统 0 视场、0.7 视场、1 视场进行失调状态仿真,得出失调数据,再利用 Matlab 对以上数据进行处理分析,研究其失调特性,求得不同失调量分别与各阶 Zernike 多项式系数  $Z_5$ 、 $Z_6$ 、 $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_9$  的关系曲线图见图 2:

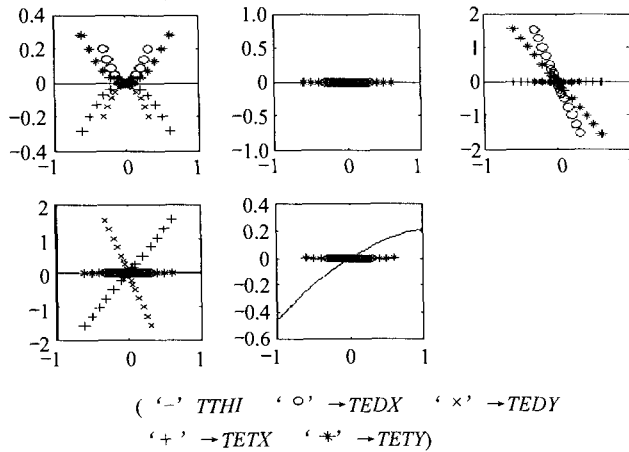


图 2 在 0 视场时失调量与各阶 Zernike 多项式系数关系曲线图

Fig. 2 The corresponding relationship between misalignments and Zernike polynomial coefficient in 0 field

图 2 为在 0 视场时失调量与各阶 Zernike 多项式系数关系曲线图( $X$  轴为失调量, $Y$  轴为波像差), 0.7 视场、1 视场关系曲线图与 0 视场类似。从图 2 中可以看出在不同的视场时失调量与  $Z_6$ 、 $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_9$  成线性或近似线性关系,而与  $Z_5$  成非线性关系,所以选择  $Z_6$ 、 $Z_7$ 、 $Z_8$ 、 $Z_9$  作为评价函数,可得到灵敏度矩阵表 1:

$S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{13}$  分别为 0 视场、0.7 视场、1 视场对应的球差,  $S_{21}$ 、 $S_{22}$ 、 $S_{23}$  为  $X$  方向的彗差,  $S_{31}$ 、 $S_{32}$ 、 $S_{33}$  为  $Y$  方向彗差,  $S'_{31}$ 、 $S'_{32}$ 、 $S'_{33}$  为  $45^{\circ}$  方向的像散。

对关系曲线图及灵敏度矩阵进行分析可以得到卡塞格林系统的以下失调特性:

- (a)  $Z_9$  几乎只与主镜与次镜之间的空气间隔( $TTHI$ )有关,而其它失调量对  $Z_9$  的影响可以忽略不计;
- (b) 次镜  $X$  方向的偏心( $TEDX$ )与次镜  $Y$  方向的倾斜( $TETY$ )的相关性很好,可以利用  $TEDX$  来

弥补  $TETY$ ;

(c) 次镜  $Y$  方向的偏心( $TEDY$ )与次镜  $X$  方向的倾斜( $TETX$ )的相关性很好,可以利用  $TEDY$  来弥补  $TETX$ 。

表 1 系统灵敏度矩阵  
Tab. 1 Sensitivity matrix

$\Delta f$	$TTHI$	$TEDX$	$TEDY$	$TETX$	$TETY$
$S_{11}$	0.33646	0	0	0	0
$S_{21}^x$	0	-5.105392	0	0	-2.286994
$S_{21}^y$	0	0	-5.105392	-2.286994	0
$S_{31}'$	0	0	0	0	0
$S_{12}$	0.336775	0.000302	0	0	0.00041
$S_{22}^x$	0	-5.109228	0	0	-2.590093
$S_{22}^y$	0	0	-5.107136	2.588314	0
$S_{32}'$	0	0	-0.853256	0.5038	0
$S_{13}$	0.3371	0.000448	0	0	0.000593
$S_{23}^x$	0	-5.113204	0	0	-2.59331
$S_{23}^y$	0	0	-5.108994	2.589686	0
$S_{33}'$	0	0	-1.219256	0.719966	0

### 5 卡塞格林系统装调方案

通过以上对卡塞格林系统失调特性分析,可以确定以下装调方案:

- (1) 首先利用  $Z_0$  计算调整主镜与次镜之间的空气间隔( $TTHI$ );
- (2) 其次计算调整次镜  $X$  方向的偏心( $TEDX$ )与次镜  $Y$  方向的偏心( $TEDY$ );
- (3) 最后调整次镜  $X$  方向的倾斜( $TETX$ )与次镜  $Y$  方向的倾斜( $TETY$ )。

### 6 计算机模拟计算失调量

在 Zemax 中对卡塞格林系统分别人为地加入不同的失调量,利用建立的数学模型及上面求得的灵敏度矩阵计算出失调量,计算结果见表 2。

表 2 引入失调量与计算结果对比  
Tab. 2 The comparison between real misalignment and result

Real misalignment	① $TEDX=1\text{mm}$ $TEDY=1.5\text{mm}$	② $TTHI=1\text{mm}$ $TEDX=0.5\text{mm}$ $TEDY=1\text{mm}$	③ $TEDX=1\text{mm}$ $TEDY=1\text{mm}$ $TETX=0.5^\circ$	④ $TTHI=0.7\text{mm}$ $TEDX=0.5\text{mm}$ $TEDY=0.8\text{mm}$ $TETX=0.5^\circ$ $TETY=0.3^\circ$
$TTHI(\text{mm})$	0.0007	0.9898	0.0119	0.6974
$TEDX(\text{mm})$	1.0051	0.4844	1.0033	0.6527
$TEDY(\text{mm})$	1.4916	1.021	0.747	0.548
$TETX(^{\circ})$	-0.0166	-0.0375	-0.0016	0.0017
$TETY(^{\circ})$	-0.01	0.0307	-0.0065	-0.0019

表 2 中,位移单位为 mm,角度单位为( $^{\circ}$ )。从表 2 中可以发现,当存在倾斜时,计算结果并不准确(如第 3、4 组数据所示)。这是因为次镜  $X$  方向的偏心( $TEDX$ )及  $Y$  方向的偏心( $TEDY$ )分别对次镜  $Y$  方向的倾斜( $TETY$ )及  $X$  方向的倾斜( $TETX$ )进行了补偿。

表 3 及表 4 分别为表 2 中第 3、4 组数据在根据计算结果进行调整前后成像质量对比。从表 3 及表 4 中可以看到,虽然系统各镜面并不处于理想的位置,存在一定的失调量,但是由于平移对倾斜进行了补偿,系统成像质量很好,故接近理论像质。

从这个例子可以看出,当系统存在一定失调量时,也能得到很好的成像质量。所以在进行装调前应

对系统进行装调特性分析,在保证像质的前提下,尽可能地选取最少的调整量,从而简化装调过程、缩短装调时间、提高装调精度。

表 3 调整前后成像质量对比  
Tab. 3 The comparison before and after adjustment

	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>
Before adjustment	1.109421	3.232984	-5.167285	-3.852693	0.002484
After adjustment	-0.013995	0	0	-0.000636	0.000571

表 4 调整前后成像质量对比  
Tab. 4 The comparison before and after adjustment

	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>
Before adjustment	0.408847	1.493831	-3.022503	-2.593586	0.195032
After adjustment	-0.008875	-0.01714	-0.08877	-0.00235	0.00157

### 7 结 论

较全面地介绍了卡塞格林系统计算机辅助装调的基本原理及方法,对卡塞格林系统的失调特性进行了分析,讨论了像差与各装调参量之间的对应关系,确定了卡塞格林系统的装调方案。按照所确定的装调方案对系统进行模拟失调分析计算,结果显示方案是正确有效的,并且所确定的卡塞格林系统的装调方案与实际的装调过程十分吻合。所以,对卡塞格林系统的装调及以后计算机辅助装调进一步的研究工作具有很好的指导性与实用性。

### 参 考 文 献:

[1] 杨晓飞,张晓辉,韩昌元. Zemax 软件在离轴三反射系统计算机辅助装调中的应用[J]. 光学精密工程,2004,12(3):270-274.  
 [2] 林 强,金春水. 离轴照明 Schwarzschild 投影物镜的计算机辅助装调方法[J]. 光学精密工程,2003,11(2):144-149.  
 [3] 林妩媚. 光学系统计算机辅助装调(CAA)机理的研究[J]. 光电工程,1999,26(增刊): 49-52.  
 [4] Figoski J W, Shrode T E, Moore G F. Computer-aided alignment of a wide-field three-mirror, unobscured, high resolution sensor[J]. SPIE,1987,1049:166-177.



## 最大数码相机可拍宇宙

在智利的安第斯山脉之上,天文学家计划建造一座具有全景式视野的天文望远镜。这个全称为“大口径全景巡天望远镜”(LSST)的庞然大物,能够向人们展现宇宙的整体景观。

据报道,LSST 将是世界上最大的天文望远镜,该项目计划在 2011 年完成。届时,LSST 将一周若干次巡测星空,每一次都能够观测到整个星空。

LSST 的独到之处还在于它所配置的数码相机。这架全自动的数码相机每隔 15s 就能拍摄一张图像,图像的直径是月亮直径的 7 倍。它还能每隔 3 天得到一张星空的全景图像,像素达到 3200MB。它能揭示出更多关于神秘的“暗物质”的秘密,那些“暗物质”推动了宇宙的膨胀。

这座大口径的全景巡天望远镜将被安置在智利帕切翁山顶上的天文台里。参与项目的天文学家们把这台望远镜称为“第一道光”。

(摘自《科技日报》)