

《星载一体化》专题文章导读

金光

中科院 长春光学精密机械与物理研究所

自从1957年人造航天器首次进入太空,人类对航天器的研制已经走过了60个年头。在这60年中,涌现出了人造卫星、航天飞机、载人飞船、地外天体探测器与登陆器、国际空间站等各种航天器,这些航天器种类繁多,争奇斗艳,在各种应用中发挥着巨大的作用。随着科学技术的发展,当今航天器的研制水平、功能作用、技术指标已经跟几十年前不啻天壤。那么,是什么促使航天水平如此突飞猛进呢?航天水平快速推进的直接动力应该是需求。今天,人们可以在家中很自然、很方便地享受科技进步带来的舒适而便利的生活。航天技术也跟其他科技成果一样,成为百姓生活不可或缺的元素。天气预报、电视转播、通信、导航等等,各种获益于航天的技术成果已经渗透到人类生活的方方面面。所以,人类对航天技术的需求在不断地放大,而放大的需求也成为人类不断探索新技术的动力。

80年代末出现的小卫星,质量轻、体积小、成本低、研制周期短、功能密度高。为了体现小卫星“小、轻、快、省”等众多优点,人们引入了许多新的设计思想和技术,包括微电子机械(MEMS)技术的应用,先进器件的选用,新型材料的应用,商用器件的选用以及一体化的设计思想等。

然而,当前小卫星的设计依然采用传统卫星的研制思路,即有效载荷和服务系统(卫星平台)分头研制。这种卫星的最大不足是由于各系统分别研制而造成结构上的不合理以及功能上的重复,与当前小卫星“小、轻、快、省”的特点背道而驰。顾名思义,星载一体化就是卫星平台与有效载荷的一体化,是以有效载荷为中心展开设计。在进行整星设计时,兼顾双方利益,将载荷和平台有机结合起来,使整体性能达到最优。

本专题论文均来源于星载一体化课题,涉及到卫星轨道理论、空间相机光学系统、星载一体化结构设计、卫星姿态控制以及小卫星座等相关内容。

《共轴TMA反射镜面形不规则对波前误差的影响》一文,以某遮拦比为22.3%的共轴三反系统的 $\Phi 600$ mm主镜为例,分析了主镜、次镜和三镜面形不规则的影响以及传递函数下降的情况,并将分析结果作为参考对主镜支撑进行了改进,根据像差容限和系统的环境耐受力,分解出主镜加工所需的精度应优于 $\lambda/36.5$ 。

《星载光学遥感器地面幅宽与轨道参数之间关系》一文,以太阳同步轨道为例讨论了星载光学遥感器地面幅宽与轨道参数(特别是轨道高度)的关系,提出了满足星载光学遥感器地面幅宽要求的太阳同步轨道高度的选取方法。通过引入假想交点的概念,推导出了交点周期、基本交点距与轨道高度的关系,并在此基础上,得出了满足幅宽要求的轨道高度的约束条件。

《敏捷小卫星姿态机动切换算法》一文,利用刚体小卫星作为研究对象,提出了切换控制算法对小卫星机动进行控制,并对控制力矩陀螺的力矩进行合理调节,避免饱和和奇异。利用添加零运动的伪逆操纵律对SGCMGs进行操控。仿真结果表明,小卫星俯仰轴14 s内机动 45° ,平均速度达到 $3.2^\circ/\text{s}$,证明这种切换算法满足小卫星敏捷性需要。

《新型轻质大口径空间反射镜支撑设计》一文,从主反射镜组件的轻质化设计入手,从结构材料的选择、主镜轻量化形式的确定以及支撑结构的合理设计三个角度系统地进行了一体化结构—热设计。并针对某型卡塞格林系统 $\Phi 650$ mm口径主镜进行了轻质化设计,三点为主多点为辅的支撑方案在保持组件结构刚度满足力学要求的同时,使反射镜具有良好的热尺寸稳定性,反射镜组件各项指标完全满足光学系统对主反射镜的设计要求。

《快速机动小卫星执行机构研究》一文,根据控制力矩陀螺的工作原理,设计了控制力矩陀螺原理样机,并利用单轴气浮转台进行了控制力矩陀螺的半物理仿真实验。实验结果表明控制力矩陀螺作为小卫星执行机构,可使小卫星在8 s内机动 20° ,机动速度可达 $2.5^\circ/\text{s}$ 。

《基于VSCMG的卫星姿态控制仿真系统研究》一文,介绍了一种新型的卫星姿态控制全物理仿真平台,结合喷气推力机构作为系统的辅助执行机构给控制力矩陀螺进行卸载。给出了整个仿真系统的软硬件构成,并结合传感器和执行机构参数进行建模和误差分析。

《高精度激光通信小卫星座仿真平台设计》一文,针对小卫星座中卫星激光通信的要求,提出了一种高精度激光通信小卫星座仿真平台。该仿真平台根据任务需要进行双星主从控制、双星协同控制、三星主从控制、三星协同控制和单星故障控制仿真,仿真结果满足小卫星座激光通信的要求。

《空间相机外遮光罩结构与优化》一文,介绍了某空间相机外遮光罩的结构及其特点,选择了以碳纤维复合材料和钛合金为主要材料进行了结构设计。以外遮光罩质量最轻为优化目标,利用有限元法对该外遮光罩进行了优化设计。优化结果表明,相机外遮光罩的质量由7.2 kg减少到4.4 kg,质量下降了38.9%。

文章编号 1004-924X(2008)08-1516-06

共轴 TMA 反射镜面形不规则对波前误差的影响

钟 兴^{1,2}, 金 光¹, 王 栋^{1,2}, 闫 勇^{1,2}

(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 研究生院, 北京 100039)

摘要:以某遮拦比为 22.3% 的共轴三反系统的 $\Phi 600$ mm 主镜为例, 分析了主镜、次镜和三镜面形不规则对高斯焦点波前差的影响, 并拟合了数学表达式。使用环域修正 Zernike 多项式作为光机接口, 分析了环境对反射镜面形的影响以及传递函数下降的情况, 并将分析结果作为参考对主镜支撑进行了改进。根据像差容限和系统的环境耐受力, 分解出主镜加工所需的精度应优于 $\lambda/36.5$ 。

关键词:共轴三反系统; Zernike 多项式; 面形不规则; 波前差

中图分类号: V475.3; TH703 文献标识码: A

influence of surface irregularity of on-axis TMA mirror on wave-front error

ZHONG Xing^{1,2}, JIN Guang¹, WANG Dong^{1,2}, YAN Yong^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

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

Abstract: By taking an actual on-axis Three Mirror Anastigmatic(TMA) system with a $\Phi 600$ mm primary mirror for example, the influences of the surface irregularities of primary mirror, secondary mirror and tertiary mirror on Gaussian focus wave-front error were analyzed, and the mathematic expressions of the influences were fitted. Circle field fixed Zernike polynomial was used as an optic-mechanic interface to analyze the environment influence on primary mirror and system performance degeneration. Finally, by taking the result as reference, the supporting structure of primary mirror was improved. Based on the Marechal criterion and environment endurance, the manufacturing accuracy of primary mirror is deduced, which shows that it should be higher than $\lambda/36.5$.

Key words: on-axis Three Mirror Anastigmatic(TMA) system; Zernike polynomial; surface accuracy; wave-front error

1 引言

随着航天光学遥感分辨率的提高, 质量和

体积的减小, 空间相机光学系统相对孔径越来越小, 国外如 IKONOS、QUICKBIRD 等空间相机均使用了相对孔径 $< 1/10$ 的共轴三反光学系统, 美国火星探测器上的轻型高分辨光学相机

收稿日期: 2008-05-30; 修订日期: 2008-06-06.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA12Z113)

HIRISE^[1]相对孔径甚至只有 1/24。相对孔径下降引起衍射极限的降低,在探测器采样 Nyquist 频率处可提供的传递函数值也随之下降,因此,为了实现设计指标,对传递函数光学串中的各个环节进行精确计算尤为重要。

由光学理论可以知道,反射镜的面形不规则误差属于局部误差,可造成系统传递函数的下降,且不可补偿。目前对三反射镜系统面形精度要求的提出一般都参考 W. B. Wetetherell^[2]的研究,但通过不同的三反射镜系统对比发现,由于反射镜曲率和间距的不同,面形不规则造成的传函下降也是不同的。如果完全按照 W. B. Wetetherell 的标准,可能会造成时间和成本的浪费。

目前的空间相机光学系统普遍采用非球面,加工难度较大。另外,为了满足高比刚度要求,一般均选用 SiC 材料进行反射镜设计,由于 SiC 硬度较大,使得加工周期更为漫长。例如从 $\lambda/30$ 加工到 $\lambda/50$ 的时间可能是从 $\lambda/5$ 加工到 $\lambda/30$ 的数倍。因此,反射镜加工精度不应独立给出,而应根据具体系统具体分析,同时参考环境影响耐受力等因素。

本文针对某具体共轴 TMA 光学系统进行了反射镜面形不规则对像质影响的分析,得到了用各反射镜面形差表达的高斯焦点波前差数学式,并结合环境影响,分解了主镜的加工精度要求。

2 光学设计及光机接口

2.1 共轴 TMA 系统介绍

如图 1 所示为某小相对孔径共轴 TMA 光学系统,主镜为凹椭球面,口径为 $\Phi 600$ mm,采用三点方式支撑;次镜为凸双曲面,遮拦比为 24%;三镜为凹椭球面,系统设计达到的高斯焦点波前差为 0.0256λ 。

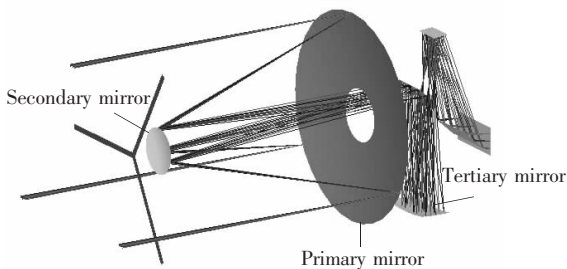


图 1 共轴 TMA 光学系统

Fig. 1 On-axis TMA optical system

焦平面选用 $8.75 \mu\text{m}$ 像元尺寸的 TDICCD 器件, Nyquist 频率为 57.14 lp/mm , 在 Nyquist 频率处,全视场全波段的平均调制传递函数为 0.328 。

2.2 反射镜面形拟合

使用具有正交性的 Zernike 多项式作为反射镜结构变形和光学设计之间的光机接口^[3],可分析系统的性能随面形不规则误差的变化情况。

在极坐标系中, Zernike 多项式可表示为:

$$Z_n^l(\rho) = R_n^l(\rho) * \Theta_n^l(\theta), \quad (1)$$

式中 $n=0, 1, 2, \dots$ 为多项式的阶数; l 为与阶数有关的序号, l 的值恒与 n 同奇偶性,且绝对值小于或等于阶数 n 。

令 $l=n-2m$ ($m=1, 2, 3, \dots, n$), 有:

$$R_n^l(\rho) = \begin{cases} \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s!(m-s)!(n-m-s)!} \rho^{n-2s}, & (n-2m \geq 0) \\ R_n^{|n-2m|} & (n-2m < 0) \end{cases},$$

$$\Theta_n^l(\theta) = \begin{cases} \cos(n-2m)\theta & (n-2m \geq 0) \\ -\sin(n-2m)\theta & (n-2m < 0) \end{cases},$$

式中 s 为循环变量。

选用 Zernike 多项式作为基底函数系,则变形后光学元件表面函数 ΔZ 的表达式为:

$$\Delta Z(\rho, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} C_k Z_k^l(\rho, \theta), \quad (2)$$

式中 C_k 为 Zernike 系数,拟合过程就是求解系数 C_k 的过程。

由于共轴 TMA 光学系统具有中心遮拦,即其光瞳不再是圆形而是圆环形。如果采用传统的在圆域上正交的 Zernike 多项式来处理有中心遮拦的主镜面形,就必须人为地把中心遮拦连接起来以形成圆域。这样一来对中心遮拦部分必然会人为地带来连接误差,从而得不到正确的拟合结果。因此必须对上述传统的 Zernike 多项式进行修正,使其在圆环形区域上正交^[4]。对于归一化后的光学表面,假设其遮拦半径 $\epsilon < 1$ 。利用构成雅克比多项式的方法,把序列 $1, \rho^2, \dots, \rho^{2n}$ 在 $[\epsilon, 1]$ 上正交,取权重因子为 1,得到 $m=0$ 时的 Zernike 多项式:

$$R_{2j}^0(\rho, \epsilon) = P_j^{(0,0)} \left[\frac{2(\rho^2 - \epsilon^2)}{1 - \epsilon^2} - 1 \right], \quad (3)$$

式中 P_j 为勒让德 (Legendre) 多项式, $j=0, 1, 2, \dots$ 。令:

$$Q_j^0(\rho^2) = R_{2j}^0(\rho, \epsilon),$$

$$h_j^0 = \frac{1 - \epsilon^2}{2(2j + 1)}.$$

当 $m=1, 2, 3 \dots$ 时, 用递推公式求 $R_{2j+m}^m(\rho, \epsilon)$:

$$R_{2j+m}^m(\rho, \epsilon) = \left[\frac{1 - \epsilon^2}{2(2j + m + 1)h_j^m} \right]^{\frac{1}{2}} \rho^m Q_j^m(\rho^2)$$

式中:

$$Q_j^m(\rho^2) = \frac{2(2j + 2m - 1)h_j^{m-1}}{(j + m)(1 - \epsilon^2)} \frac{h_j^{m-1}}{Q_{j-1}^{m-1}(0)} * \sum_{i=0}^j \frac{Q_i^{m-1}(0)Q_i^{m-1}(\rho^2)}{h_i^{m-1}},$$

$$h_j^m = -\frac{2(2j + 2m - 1)}{(j + m)(1 - \epsilon^2)} \frac{Q_{j+1}^{m-1}(0)}{Q_j^{m-1}(0)} h_j^{m-1}.$$

在 Zernike 多项式中, 与 θ 有关的项为:

$$H_{2j+m}^m(\theta) = \begin{cases} \cos(m\theta) & m \geq 0 \\ \sin(m\theta) & m < 0 \end{cases}.$$

则修正后的 Zernike 多项式为:

$$G_{2j+m}^m(\rho, \theta, \epsilon) = R_{2j+m}^m(\rho, \epsilon) H_{2j+m}^m(\theta). \quad (4)$$

对于式(4), 当 $\epsilon=0$ 时, 即变成传统的 Zernike 多项式。为书写方便, 将 $G_{2j+m}^m(\rho, \theta, \epsilon)$ 写成 $G_k(\rho, \theta, \epsilon)$ 。其中, $k = \left[\frac{(2j+m)(2j+m+1)}{2} \right] + j + 1$ 。

如果把元件表面函数 ΔZ 展开成共有 n 项的 Zernike 多项式, 则:

$$\Delta Z(\rho, \theta, \epsilon) = \sum_{i=1}^n C_k G_k(\rho, \theta, \epsilon), \quad (5)$$

式中 C_k 为多项式的系数。此修正后的 Zernike 多项式即可用于中心遮拦主镜面形的拟合。

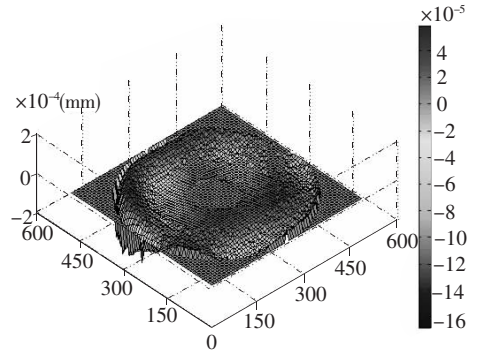
3 分析实验过程

3.1 面形对波前差的影响

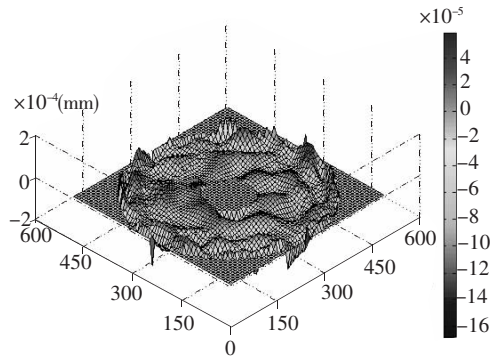
利用 Zernike 多项式为接口, 在 ZEMAX 软件中对波前差的均方根期望值进行公差分析。

一般而言, 选用的 Zernike 多项式的项数越多, 在公差分析中所生成的面形起伏也就越多, 代表的表面误差频率也就越高^[5]。当表面误差 RMS 值为 20 nm 时, 36 项 Zernike 多项式按误差分布生成同轴三反系统主镜的典型面形不规则如图 2(a) 所示, 而 80 项的面形不规则如图 2(b) 所示。

反射镜面形的高频误差主要取决于研磨, 极高频误差取决于抛光, 两者都可以得到较好的控制, 且随环境改变不大。而低频误差在加工和装调中受重力、温度等影响随时变化, 是主要需要严



(a) 36 项 Zernike 多项式模拟低频误差
(a) Simulating low frequency by 36 terms



(b) 80 项 Zernike 多项式模拟高频误差
(b) Simulating high frequency by 80 terms

图 2 模拟主镜面形误差随 Zernike 多项式项数变化
Fig. 2 Simulated primary mirror surface error changed with terms of Zernike polynomial

控的误差源, 因此本文主要研究了用 36 项 Zernike 拟合系数表示的低频面形误差, 较少的项数也利于优化计算速度, 便于计算机辅助装调等。

反射镜的面形不规则引起高斯焦点波前差增大, 像质发生退化。对同轴三反系统主镜、次镜和三镜表面不规则度对波前差的均方根期望值进行公差分析的结果如图 3 所示。

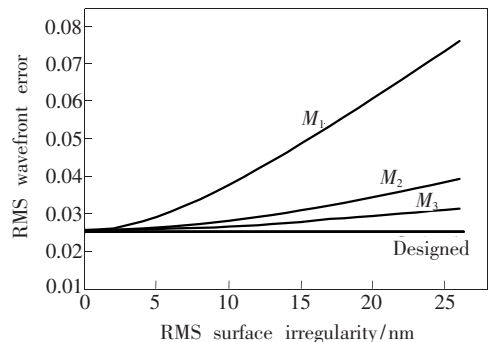


图 3 波前差均方根期望分析结果
Fig. 3 Estimated RMS wave-front error

图 3 中横坐标为反射镜表面不规则 RMS 值,纵坐标为高斯焦点波前差。最下方的直线代表波前差设计值 0.0256λ ,曲线 M_1 、 M_2 和 M_3 分别为主镜、次镜和三镜面形不规则引起的波前差变化。

从图 3 中可以看出,当 25 nm 的表面不规则 RMS 值作用在主镜上时,波前差将变为设计值的 2.8 倍,而作用在次镜和三镜上时,波前差为设计值的 1.5 倍和 1.2 倍。对于同轴三反系统的性能,主镜面形影响最为显著,次镜和三镜的影响次之。

利用二次多项式对不规则 RMS 波前差曲线进行近似拟合,得到:

$$\begin{cases} W_1 = 5.5 \times 10^{-5} S_1^2 + 6.6 \times 10^{-4} S_1 + 0.0256 \\ W_2 = 1.9 \times 10^{-5} S_2^2 + 6.0 \times 10^{-5} S_2 + 0.0256 \\ W_3 = 1.0 \times 10^{-5} S_3^2 - 1.0 \times 10^{-5} S_3 + 0.0256 \end{cases} \quad (6)$$

式中, S_1 、 S_2 和 S_3 分别为主镜、次镜和三镜的表面不规则度 RMS 值, W_1 、 W_2 和 W_3 为主镜、次镜和三镜引起的波前差。因此,此同轴三反系统总的高斯焦点波前差可表示为:

$$W_0 = \sqrt{W_1^2 + W_2^2 + W_3^2} \quad (7)$$

3.2 环境造成的传递函数下降

空间相机从地面加工装调到在轨飞行工作,其重力环境和温度条件的改变会导致反射镜镜面形的变化,进而影响到整机的成像质量。可用环境作用因子 K 作为环境影响大小的度量,定义为 K 环境作用下的传递函数衰减与原始传递函数值之比。即:

$$K = (MTF_{\text{initial}} - MTF_{\text{changed}}) / MTF_{\text{initial}} \quad (8)$$

K 值越大,代表环境对光学系统性能影响越大,空间光学系统为达到衍射分辨率,一般应用于 $K \leq 0.2$ 的情况下。本文共轴三反系统要求适应 $\pm 8^\circ\text{C}$ 温度变化,分析以此作为前提条件。

对反射镜支撑结构进行初步设计,在 1 g 重力和 8°C 温度变化作用下,主镜的 RMS 面形误差为 14 nm,次镜的 RMS 面形误差为 1.3 nm,三镜的 RMS 面形误差为 10 nm。主镜面形如图 4 (a)所示。

对分析获得的反射镜面形变化量进行处理,并进行 Zernike 多项式拟合。表 1 第二列给出了得到的主镜变形拟合 Zernike 系数前 9 项的值。

将拟合得到的主镜、次镜和三镜的 Zernike 系数输入 ZEMAX 软件,可以得到下降后的传递

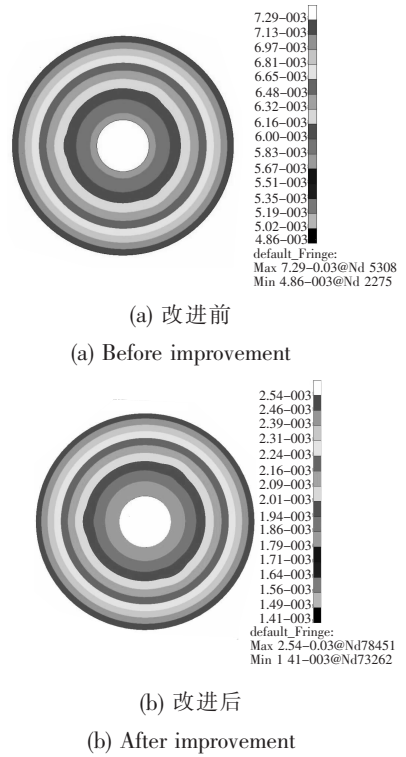


图 4 环境变化对主镜面形的影响

Fig. 4 Environment influence on primary mirror

表 1 主镜 Zernike 系数前 9 项

Tab. 1 The first 9 Zernike coefficients of primary mirror

Zernike 系数	改进支撑前	改进支撑后
Z_1	2.36×10^{-2}	-2.30×10^{-2}
Z_2	1.10×10^{-3}	-1.74×10^{-6}
Z_3	1.18×10^{-6}	-7.80×10^{-6}
Z_4	3.33×10^{-4}	-4.59×10^{-4}
Z_5	6.72×10^{-6}	-9.70×10^{-7}
Z_6	-1.28×10^{-6}	1.08×10^{-8}
Z_7	-4.67×10^{-8}	-1.96×10^{-8}
Z_8	-2.74×10^{-6}	1.73×10^{-8}
Z_9	-2.48×10^{-5}	1.21×10^{-7}

函数曲线。图 5 中,最上方的曲线为原始传递函数, C_1 为初步支撑设计的环境影响传递函数曲线,在 Nyquist 频率处,传递函数值由 0.328 降为 0.184,环境作用因子为 0.44,此值较大。为了进一步减小环境影响,对主镜柔性支撑及背板材料进行了优化和改进^[6],改进后的主镜面形分析结果如图 4(b)所示, RMS 面形误差为 $W_{\text{environment}} = 8 \text{ nm}$ 。

拟合得到的 Zernike 系数如表 1 第三列所示。主镜面形误差的减小使传递函数曲线得到较大提升,变化如图 5 中 C_2 所示, Nyquist 频率处传递函数为 0.296,环境作用因子降低至 0.1,满足使用要求。

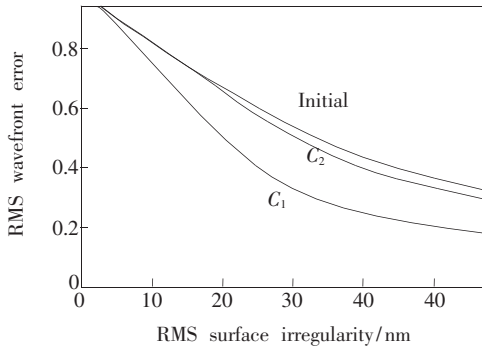


图 5 MTF 在 Nyquist 频率处的下降

Fig. 5 Degeneration of MTF at Nyquist frequency

3.3 主镜加工精度分配及实际性能分析

根据 Marechal 判据,当衍射焦点处的归化强度 ≥ 0.8 时,该系统认为已校正正好,即波面偏离以衍射焦点为中心的参考球面的均方根偏差不得超过 $\lambda/14$,即 $0.0714\lambda^{[7]}$,

$$W_0 \leq 0.0714\lambda. \quad (9)$$

从前面的分析可知,为使主镜易于加工,可把次镜和三镜加工精度适当提高。考虑环境因素和难易度,将次镜加工精度设置为表面 RMS 值优于 $\lambda/50$,三镜为 $\lambda/40$,则

$$S_2 = \sqrt{(632.8/50)^2 + 1.3^2} = 12.7 \text{ nm}$$

$$S_3 = \sqrt{(632.8/40)^2 + 10^2} = 18.7 \text{ nm}$$

综合式(6)、(7)和(9),得到主镜面形精度 RMS 值应优于 19.1 nm,去除环境造成的误差,加工精

度 RMS 值应优于 17.34 nm,即 $\lambda/36.5$ 。

对主镜、三镜和次镜的加工精度进行公差分析,误差为正态分布,利用蒙特卡罗法产生 10^4 个样本来模拟实际加工得到的系统性能,结果如图 6 所示,样本的均方根期望值为 0.0547λ 。

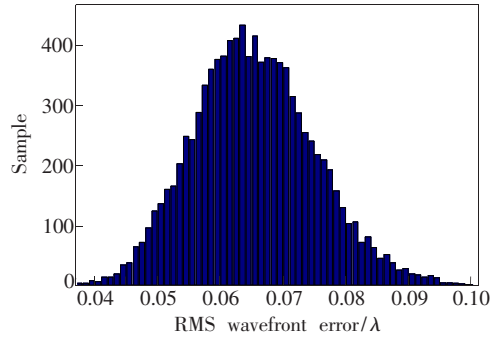


图 6 蒙特卡罗分析结果

Fig. 6 Monte Carlo analysis result

4 结论

反射镜面形的不规则对同轴三反光学系统的性能存在较大影响,考虑到应用环境和非球面加工周期等环节,应该建立综合标准进行评估以实现工期和成本的最优。特别是主镜加工精度的分配,应该建立在环境影响分析和次镜、三镜加工精度分配的基础上。

本文所做工作证明,将利用 Zernike 多项式拟合反射镜面形作为工程分析和光学设计的接口,便于分析光学和结构的设计结果,使光学系统中的像差容限标准与有限元分析的结果建立联系,为优化设计提供依据,对于实际工程研制具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] ZYREK R. Mars exploration strategy: follow the water [C/OL]. *Keynote Presentation, 24th Annual AAS Guidance and Control Conference, Breckenridge, CO, Feb., 2001*. http://marsoweb.nas.nasa.gov/HIRISE/papers/other/gallagher_SPIE_2005.pdf
- [2] WETHERELL W B. Image quality criteria for the large space telescope [C]. *Space Optics, Proceedings of the Ninth International Congress of the International Commission for Optics, National Academy of Sciences, Washington, D. C., 1974*:55-103.
- [3] 单宝忠,王淑岩,牛慈笨. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. *光学精密工程*, 2002,10(3):318-323.
SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B. Zernike polynomial fitting method and it's application[J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2002, 10 (3):318-323. (in Chinese)

- [4] 杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. Zemax 软件在离轴三反射镜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.
YANG X F, ZHANG X H, HAN CH Y. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2004, 12 (3):270-274. (in Chinese)
- [5] Zemax. *Optical Design Program User's Guide* [M]. 7th ed. Zemax Development Company, 1998.
- [6] 吴清文. 空间相机中主镜的轻量化技术及其应用[J]. 光学精密工程, 1997, 5(6):69-80.
WU Q W. Light-weight technology and its application of primary mirror in space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5 (6):69-80. (in Chinese).
- [7] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
WANG ZH J. *Applied Optical Technology Manual*[M]. Beijing:China Machine Press, 2007. (in Chinese)

作者简介:钟 兴(1982—),男,四川自贡人,博士研究生,主要研究方向为空间光学技术应用。E-mail:ciomper@163.com

金 光(1958—),男,吉林长春人,博士研究生,主要研究方向为空间光学总体技术。E-mail:jing@ciomp.ac.cn

● 下期预告

光电平台中陀螺解耦问题的研究

陈占军^{1,2}, 葛文奇¹, 李 英^{1,2,3}, 赵秀影^{1,4}

- (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 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;
4. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

为了解决两轴、三轴光电平台中陀螺仪的解耦问题,提高光电平台的稳定性能。分析了造成两轴光电平台陀螺仪输出耦合的原因,给出了两轴平台正割解耦的算法。结合动力调谐挠性陀螺仪的工作原理与三轴光电平台的具体结构,探讨了三轴光电平台陀螺仪耦合的原因,给出了三轴平台正弦解耦的算法以及基于 ARM 单片机的解耦软硬件处理技术。通过对三轴平台解耦实验,滚转轴 22 mV 的耦合输入,解耦后输出降低到 3 mV,耦合程度降低 86.4%,大大提高了平台高速运动时的控制性能和稳定精度。