

文章编号 1004-924X(2019)12-2517-08

应用旋转法实现大口径非球面反射镜零重力面形加工

孟晓辉*, 王永刚, 李文卿, 陈建丞, 周于鸣, 张继友

(北京空间机电研究所 国防科技工业光学超精密加工技术创新中心(先进制造类), 北京 100094)

摘要:为了在地面制造环境下实现大口径空间非球面反射镜的零重力面形加工,建立了基于重力卸载的高精度旋转检测工艺方法。首先对 N 次等间隔旋转法的基本原理进行了介绍,并结合一块 $\Phi 1\ 290\ \text{mm}$ ULE 材料的非球面反射镜加工实例,分别给出了旋转法实施环节中的旋转角度和偏心误差控制方法,实际角度误差和偏心误差分别优于 0.1° 和 $0.1\ \text{mm}$ 。然后,在低精度阶段采用了 3 次旋转法对检测结果进行处理,主镜面形精度快速收敛至 $0.029\lambda\text{-RMS}$;同时由于应用旋转法而导致镜面上的对称性误差累积放大,进行了针对性去除,面形精度进一步收敛至 $0.023\lambda\text{-RMS}$ 。最后,采用了 6 次旋转法对检测结果进行处理并指导光学加工,反射镜 6 个方向下的实测面形精度为 $0.012\lambda\text{-RMS}$,去除重力变形误差后面形精度达到了 $0.010\lambda\text{-RMS}$,该面形可以认为是卫星入轨后零重力空间环境下的反射镜面形。文中所述加工工艺方法不仅适用于米级口径,还适用于更大口径空间非球面反射镜零重力面形的高精度加工。

关键词:光学加工;光学检测;空间光学传感器;非球面反射镜;零重力面形

中图分类号:TH706 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192712.2517

Fabrication of zero-gravity surface for large-aperture aspherical mirror by using rotationally method

MENG Xiao-hui*, WANG Yong-gang, LI Wen-qing,
CHEN Jian-cheng, ZHOU Yu-ming, ZHANG Ji-you

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity,
Optical Ultraprecise Processing Technology Innovation Center for Science
and Technology Industry of National Defense, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: mrmeng_508@163.com

Abstract: To acquire the zero-gravity surface figure error of an aspherical mirror in a ground fabricating environment, a high-precision rotation method based on gravity compensation technology was established. First, the basic principle of the N equal interval rotation method is introduced. Second, combined with an aspheric ultra low expansion (ULE) mirror with a diameter of $\Phi 1\ 290\ \text{mm}$ processing, the rotation angle and off-center control methods are given, respectively, and the angle error and off-center error are better than 0.1° and $0.1\ \text{mm}$, respectively. Third, in the low-precision stage, the rotation result is processed by three-position rotations and the surface accuracy of the mirror quickly converges to $0.029\lambda\text{-RMS}$. At the same time, the symmetry error on the mirror surface is cumulatively amplified due to the application of the rotation method. After removal, the surface

收稿日期:2019-07-12;修订日期:2019-09-10.

基金项目:国防十三五技术基础科研计划资助项目(No. JSZL2017203B009)

accuracy further converges to 0.023λ -root mean square (RMS). Finally, the six-position rotations are used to guide the optical manufacturing. The surface figure error of the mirror in the six directions is 0.012λ -RMS and 0.010λ -RMS by removing the gravity deformation error, which allows it to be considered as a zero-gravity mirror in the space environment after the satellite is in orbit. The method described in the study is not only applicable to the fabrication of one meter-level mirrors, but also to larger space aspheric mirrors with the goals of a zero-gravity surface figure error.

Key words: optical fabrication; optical test; space optical remote sensor; aspheric mirror; zero-gravity surface figure

1 引言

随着大型空间光学遥感技术的发展,对光学系统中的非球面反射镜要求越来越高,主要表现在:口径越来越大,已经提高至 4 m 量级;轻量化率越来越高,从以往的 60% 提高至 85%;面形精度要求越来越高,从 0.020λ -RMS 提高至 0.013λ -RMS;但单件反射镜的研制周期却越来越短,这些无疑对现有的光学加工检测技术提出了更高的要求^[1-2]。空间反射镜工作在零重力环境下,而加工装配均在地面完成^[3]。在地面制造环境过程中,反射镜的检测结果极易受到外部环境多源误差的综合影响,除了检测光路中干涉仪的自身系统误差、辅助光学元件的加工残差、光路对准误差及气流扰动、温度变化、高频振动等检测误差,镜面的面形误差分布主要是由加工后的残余误差和重力变形误差来表征的^[4]。因此,在实际的光学加工工艺中,通常需要设计专用的重力卸载装置来补偿大口径空间非球面反射镜的重力误差,从而保证空间非球面反射镜性能的天地一致性。

重力卸载工装的安装及调整误差、反射镜与支撑工装的偏心误差等均会对重力卸载精度产生影响,难以实现真正意义上的零重力卸载,所以只有在重力卸载基础上进一步剔除重力变形才能获得反射镜的零重力面形误差。旋转检测法是一种切实可行的技术手段,常用的旋转法包括单次旋转法、 N 次旋转法和 $N+1$ 次旋转法。其中,单次旋转法^[5]只需要进行一次旋转检测即可去除检测结果中的非对称面形误差,但是在数据处理过程中会遗失中高频误差信息,无法有效地指导镜面加工; N 次旋转法需要进行等间隔 N 次不同角度状态下的面形检测^[6],测量时间较长,但精度较高; $N+1$ 次旋转法是在 N 次旋转法基础上,增加

了一次任意角度的面形检测,得到的面形误差信息更为丰富^[7],但由于空间非球面反射镜的对称结构设计,在实际检测中无法实现任意角度的面形旋转检测。对比上述三种旋转法后,认为 N 次等间隔旋转法在检测精度和检测效率之间能达到一个较为合适的平衡,更适于对空间大口径非球面反射镜进行检测数据处理。国内外学者对这一方法的研究较多^[8-12],但大多是对原理进行仿真分析,或是应用于干涉仪系统误差标定、平面镜的绝对检验和光学装调阶段的最终检测验证等领域,在大口径非球面反射镜加工领域鲜有提及。

本文针对某型号大型空间光学遥感器中一块 $\Phi 1\ 290$ mm 非球面反射镜的加工检测,给出了实施旋转法的加工检测工艺要点,并在反射镜精度逐级收敛的过程中兼顾了加工精度和检测效率,分别采用 3 次旋转和 6 次旋转法来满足不同阶段的反射镜面形加工。试验表明, N 次旋转法可以有效剥离干涉检测结果中因重力变形造成的非对称误差,但无法去除对称误差,该部分误差还需要结合实际工艺进行加工去除。所构建的加工检测工艺方法非常适合空间大口径非球面反射镜,加工效率和加工精度都有了显著的提高。

2 基本原理

在地面制造环境下,大口径非球面反射镜的检测结果包含了镜面自身的加工残余误差和重力变形误差,用公式表述为:

$$W(x, y) = S(x, y) + G(x, y), \quad (1)$$

其中: W 表示经干涉检测直接获取的面形误差结果, G 表示重力变形误差, S 表示镜面加工残余误差。

通常情况下,在反射镜检测时采取直角坐标

系,后期数据处理过程中,需要将直角坐标系转化为极坐标系,以便于进行泽尼克多项式拟合^[13]。式(1)变为:

$$W(\rho, \theta) = S(\rho, \theta) + G(\rho, \theta). \quad (2)$$

N 次旋转法是通过进行 N 次等角度间隔的绕光轴旋转检测,旋转角度 $\varphi = 2\pi/N$,则 N 次检测结果可以表示成:

$$W_1(\rho, \theta) = S(\rho, \theta) + G(\rho, \theta),$$

$$W_2(\rho, \theta) = S(\rho, \theta + \varphi) + G(\rho, \theta),$$

.....

$$W_N(\rho, \theta) = S(\rho, \theta + (N-1)\varphi) + G(\rho, \theta).$$

N 次检测结果的平均值 W_{ave} 为:

$$W_{ave} = G(\rho, \theta) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S(\rho, \theta + (k-1)\varphi), \quad (3)$$

其中 $\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S(\rho, \theta + (k-1)\varphi)$ 为反射镜 N 次旋转后的算术平均结果。将这部分进一步分成旋转对称误差和非旋转对称误差两个部分,于是式(3)可以改写为:

$$W_{ave} = G(\rho, \theta) + S_{sym}(\rho, \theta) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{asym}(\rho, \theta + (k-1)\varphi). \quad (4)$$

式(2)减去式(4),即可得到被测反射镜任一角度状态下的零重力面形误差结果:

$$W - W_{ave} = S_{asym}(\rho, \theta) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{asym}(\rho, \theta + (k-1)\varphi). \quad (5)$$

式(5)表示了经过旋转法处理后的测试结果中已经剔除了重力变形的影响,但不包含镜面的旋转对称误差和部分高频误差,其中旋转对称误差主要是以球差的形式反映在镜面上。对于大口径非球面反射镜加工来说,这表示无法对镜面上的球差和部分高频误差进行去除,而高频误差成分很小,在实际加工中可以忽略,但球差会在加工过程中逐渐累积并放大,影响面形精度和反射镜的几何参数,所以还需要结合实际工艺进行去除。

3 加工检测工艺

3.1 非球面反射镜参数

某型号空间光学遥感器光学系统中的主反射

镜,其通光口径为 $\Phi 1290$ mm,材料为 ULE,采用蜂窝夹心结构设计,轻量化率高达 80%,反射镜的凹面为非球面,顶点曲率半径 $R = 3078$ mm,非球面系数 $K = -1.65$;反射镜背面为一凸球面,镜坯整体呈双拱结构,如图 1 所示。

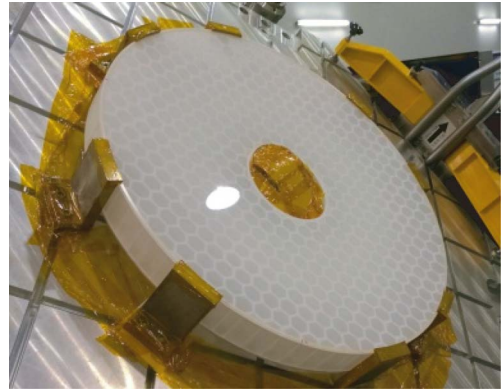


图 1 $\Phi 1290$ mm 非球面反射镜

Fig. 1 $\Phi 1290$ mm aspherical mirror

3.2 重力卸载装置

专用的重力卸载装置如图 2 所示,主要由反射镜衬板、底板、气缸促动器和配套的电控系统等组成。其中,反射镜衬板用于对双拱形反射镜进行支撑;底板是为气缸促动器提供安装基准和接口;气缸促动器用于支撑反射镜,是主要的重力卸载部件;配套的电控系统可以实现气缸促动器的独立控制。

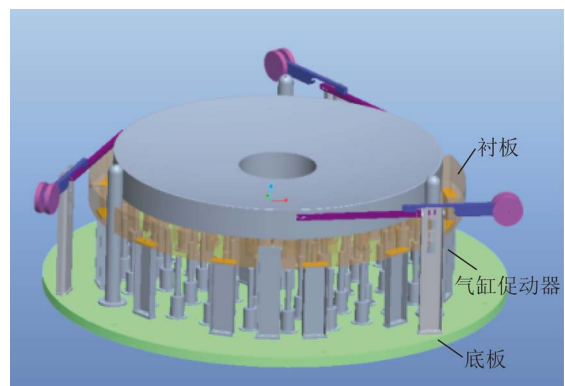


图 2 重力卸载装置

Fig. 2 Gravity offload equipment

根据工程实践经验,受重力卸载装置自身制造误差以及它与反射镜对准误差的影响,重力卸

载的实际检测精度往往比设计结果下降很多,一般不能实现严格的零重力卸载,普遍存在卸载不充分的情况,这部分卸载残余误差会以像散的形式反映到镜面上,如图 3 所示。同时由于大口径反射镜测试的不稳定性,导致各个方向下的面形测试结果不一致。所以,还需要利用旋转法测试解析出重力卸载补偿后的重力变形误差,并将这部分误差从实际检测结果中剔除以获取镜面真实的零重力面形误差。

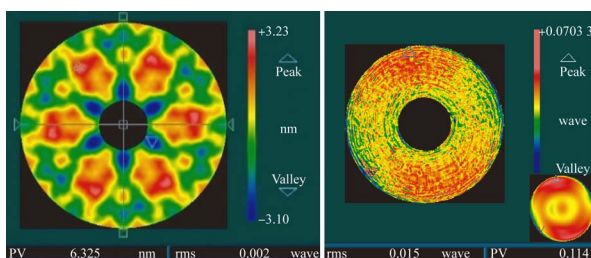


图 3 非球面镜面形的重力卸载设计结果及实际测量结果

Fig. 3 Design and measured results of aspherical mirror's figure with offload equipment

3.3 关键工艺控制方法

在应用旋转法的过程中,使用式(5)直接运算获得处理后的数据,其核心环节是如何通过工艺控制获取可靠的检测数据,以用于运算。在测试环境的影响误差已去除的前提下,提高检测准确度最关键的是对反射镜相对重力卸载的旋转角度和反射镜偏心误差进行控制。

3.3.1 旋转角度误差控制

由于 $\Phi 1\ 290\ \text{mm}$ 主镜为 60° 对称设计,在检测前,利用三坐标测量机在镜坯边缘位置处每隔 60° 进行刻线,形成 6 个标记用于后续的检测对准,如图 4 所示。在干涉检测过程中,以 0° 状态作为起始测量位置进行检测光路调整,调节两个方向下的 coma 值小于 0.01λ , Power 值小于 0.01λ ,然后利用干涉仪的“Fiducials”功能,反复调整检测光路和反射镜位置,使 0° 标记和 180° 标记与干涉图的 y 轴重合,此时就完成了 0° 状态下的面形检测和位置标定。然后,再利用激光跟踪仪建立主镜的空间位置关系,以 0° 状态下的坐标值作为基准,进行主镜等间隔 60° 旋转,每旋转至一个角度时,就按照上述步骤进行调整和激光跟踪仪标定。

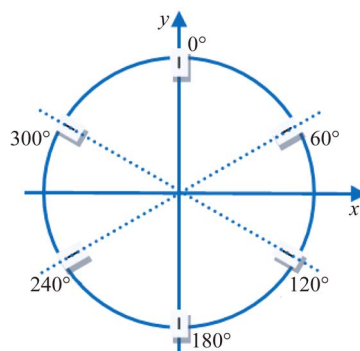


图 4 非球面镜坯三坐标机测量位置分布

Fig. 4 Arrangement of test positions on aspherical mirror via CMM

检测所采用的干涉仪分辨率为 $2\ \text{K} \times 2\ \text{K}$, 旋转角度过程中的横向偏差不超过 1 pixel, 换算成角度误差为 0.05° 。

3.3.2 反射镜偏心误差控制

这里仍然以激光跟踪仪作为辅助测量仪器,给出控制方法中的关键点。首先以重力卸载工装的底板作为基准进行圆柱测量,底板的圆柱度拟合误差为 $0.03\ \text{mm}$, 拟合出底板的中心后将它投影至反射镜衬板上作为原点。然后对反射镜衬板的端面进行平面测量,拟合出一个平面,平面度拟合误差为 $0.015\ \text{mm}$, 并定义出一个直角坐标系。最后,测量主反射镜的端面和圆周,进行反射镜中心点坐标拟合,即可得出反射镜与重力卸载工装间的偏心误差。反复调整反射镜的位置,使它在 x/y 两个方向上的偏心误差小于 $0.1\ \text{mm}$ 。

4 加工检测结果

大口径反射镜的检测是一个较为耗时的过程,所以为了验证旋转检测方法的适用范围和精度,在反射镜第一次加工前,对主镜每隔 60° 进行一次测试,共进行 6 次检测。然后对这 6 次检测结果进行 3 组独立的数据处理。

第一组取其中每隔 60° 顺序相邻的 3 次检测数据来进行处理,共得到 6 种不同的重力变形误差分布,如图 5(a)~5(f) 所示。

第二组取其中每隔 120° 的 3 个数据来进行处理,共得到 2 种重力变形误差分布,如图 5(g) 和图 5(h) 所示。

第三组对 6 次检测数据同时进行处理,求解唯一的重力变形误差分布,如图 5(i) 所示。

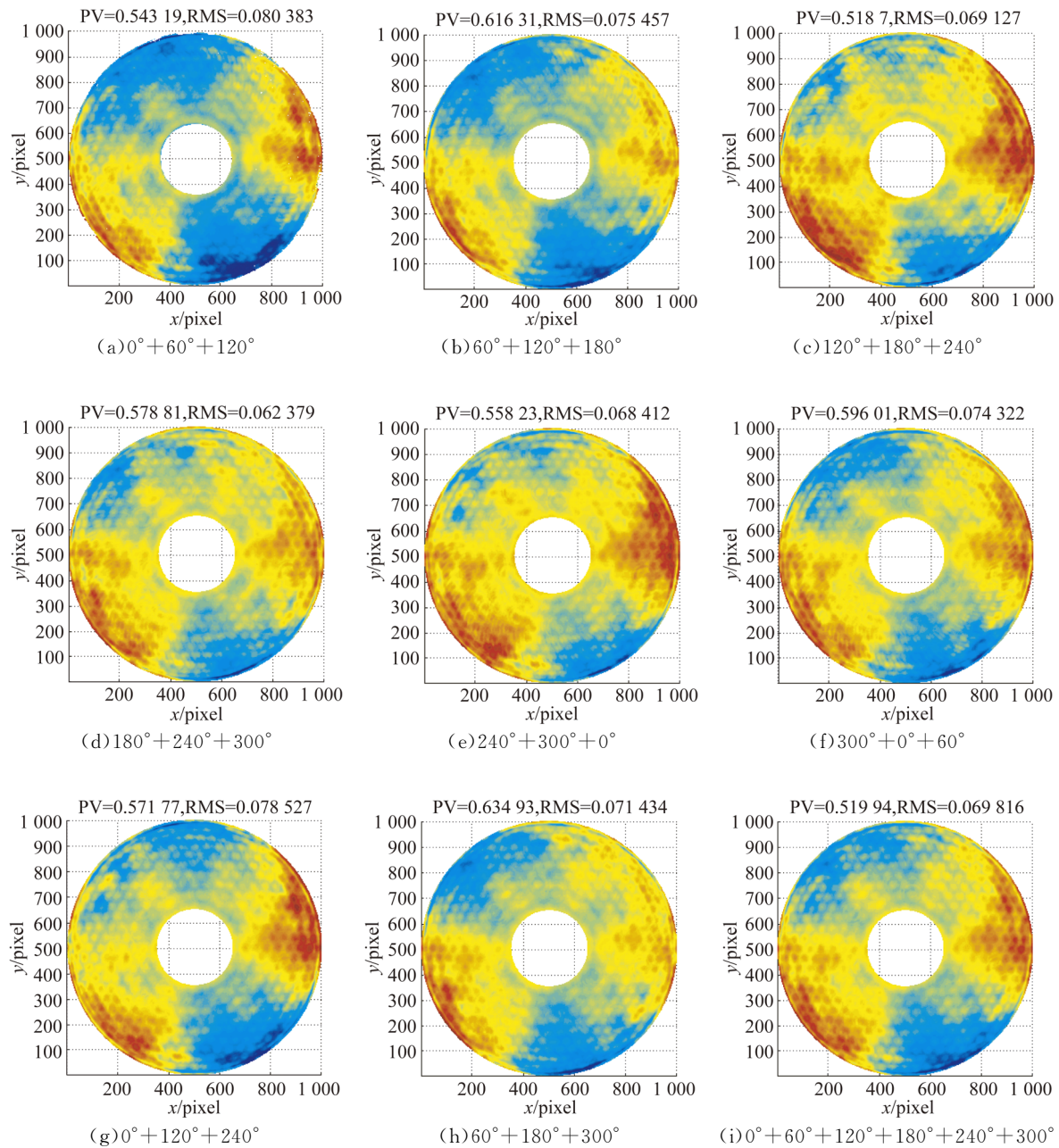


图 5 非球面反射镜的重力变形误差分布

Fig. 5 Distribution of gravity deformation error of aspherical mirror

将每组中各个角度状态下的独立测试结果减去重力变形误差,即可得到零重力面形误差分布,对这部分数据进行汇总,如表 1 所示。其中,测试序列 1~6 对应第一组数据处理过程,测试序列 7~8 对应第二组数据处理过程,测试序列 0 对应第三组数据处理过程。

对比表 1 中各个测试序列内的数据,可以得到:

(1)在测试序列 1~6 中,将检测结果剔除重力变形误差后,同一序列内不同角度间的面形最

大误差为 $\Delta PV = 0.06\lambda$, $\Delta RMS = 0.01\lambda$;不同序列间同一角度面形的最大偏差为 $\Delta PV = 0.06\lambda$, $\Delta RMS = 0.007\lambda$;

(2)在测试序列 7~8 中,不同角度下的面形最大偏差为 $\Delta PV = 0.13\lambda$, $\Delta RMS = 0.013\lambda$;

(3)将测试序列 7~8 中的测试结果与 1~6 序列中对应角度下的面形结果进行对比,最大偏差为 $\Delta PV = 0.13\lambda$, $\Delta RMS = 0.013\lambda$;

(4)测试序列 0 中不同角度下的面形最大偏差为 $\Delta PV = 0.17\lambda$, $\Delta RMS = 0.015\lambda$;

(5)将其余测试序列与测试序列 0 中结果进行对比,同一角度下的面形最大偏差为 $\Delta PV = 0.1\lambda$, $\Delta RMS = 0.007\lambda$ 。

表 1 零重力面形误差

Tab. 1 Zero gravity surface figure error

测试序列	测试角度/(°)	原始测试结果/ λ	剔除系统误差后/ λ
0	0	PV=1.068,RMS=0.135	PV=0.810,RMS=0.094
	60	PV=1.054,RMS=0.148	PV=0.718,RMS=0.094
	120	PV=0.537,RMS=0.067	PV=0.650,RMS=0.079
	180	PV=0.995,RMS=0.114	PV=0.643,RMS=0.081
	240	PV=0.892,RMS=0.129	PV=0.692,RMS=0.080
	300	PV=0.676,RMS=0.060	PV=0.743,RMS=0.094
1	0	PV=1.068,RMS=0.135	PV=0.654,RMS=0.086
	60	PV=1.054,RMS=0.148	PV=0.674,RMS=0.085
	120	PV=0.537,RMS=0.067	PV=0.678,RMS=0.086
2	60	PV=1.054,RMS=0.148	PV=0.643,RMS=0.088
	120	PV=0.537,RMS=0.067	PV=0.648,RMS=0.082
	180	PV=0.995,RMS=0.114	PV=0.598,RMS=0.080
3	120	PV=0.537,RMS=0.067	PV=0.577,RMS=0.073
	180	PV=0.995,RMS=0.114	PV=0.639,RMS=0.083
	240	PV=0.892,RMS=0.129	PV=0.614,RMS=0.079
4	180	PV=0.995,RMS=0.114	PV=0.635,RMS=0.083
	240	PV=0.892,RMS=0.129	PV=0.650,RMS=0.084
	300	PV=0.676,RMS=0.060	PV=0.669,RMS=0.082
5	240	PV=0.892,RMS=0.129	PV=0.673,RMS=0.082
	300	PV=0.676,RMS=0.060	PV=0.726,RMS=0.089
	0	PV=1.068,RMS=0.135	PV=0.716,RMS=0.093
6	300	PV=0.676,RMS=0.060	PV=0.699,RMS=0.097
	0	PV=1.068,RMS=0.135	PV=0.710,RMS=0.089
	60	PV=1.054,RMS=0.148	PV=0.656,RMS=0.090
7	0	PV=1.068,RMS=0.135	PV=0.736,RMS=0.092
	120	PV=0.537,RMS=0.067	PV=0.627,RMS=0.079
	240	PV=0.892,RMS=0.129	PV=0.662,RMS=0.077
8	60	PV=1.054,RMS=0.148	PV=0.641,RMS=0.094
	180	PV=0.995,RMS=0.114	PV=0.597,RMS=0.080
	300	PV=0.676,RMS=0.060	PV=0.669,RMS=0.090

由以上分析可知,任意 3 次旋转测试的结果由于对面形进行了平均化处理,损失了部分中高频误差信息,于是在数值和面形误差分布上较为一致,重复精度最高,且等间隔 60° 和等间隔 120° 的误差分布差异不大;6 次旋转测试的理论精度要比 3 次旋转测试精度高,各个角度下的面形差异稍大,但更接近真实情况,镜面细节信息更丰富。综合来看,在面形精度较低时,为了节省时间成本,可以根据反射镜的实际结构设计,采用任意

3 次旋转法进行检测加工,精度提升至一定阶段时,再采用 6 次旋转法进行检测精加工。

在加工前,进一步对初始面形进行频段分离,如图 6 所示。

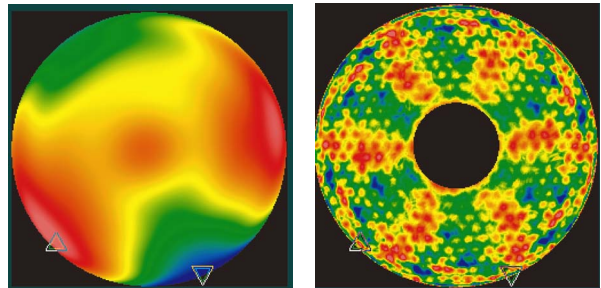


图 6 各频段面形误差
Fig. 6 Surface figure error with different frequencies

如图 6(a)所示,检测结果中的非对称误差以低频像散的形式呈现,这部分误差可以在后续加工中进行去除。图 6(b)所示的中高频误差部分则包含了两部分内容,一部分是由算法处理生成,另外一部分则是以球差形式呈现的对称性误差,这一部分误差在后续加工中会逐渐累积并放大。

以 0° 为例,在经过两轮迭代加工后,主镜的面形精度 RMS 提高至 0.029λ ,此时,由于旋转法的累积放大效应,镜面上的残余加工误差形式从初始的非对称误差占据主导演变为对称性误差占据主导,如图 7(a)所示。

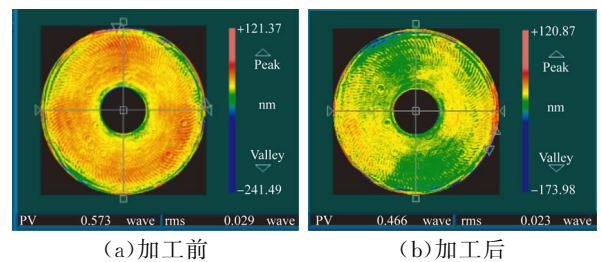
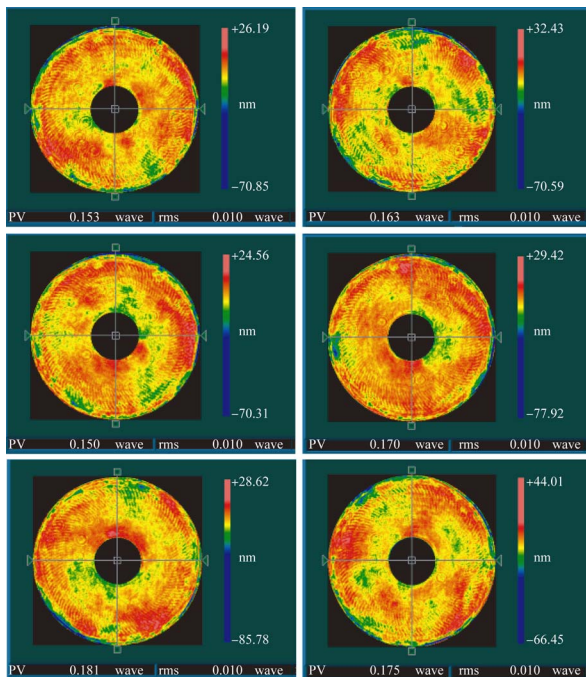


图 7 加工前后面形误差对比
Fig. 7 Comparison of surface figure error before and after fabrication

在接下来的试验中,需要针对这一对称性误差,主要为球差形式,进行加工去除,加工后如图 7(b)所示。

在后续两轮加工中,采取 6 次旋转法对主镜的检测结果进行数据处理指导加工,最终,主镜 6 个角度下的实测面形精度为 0.012λ -RMS,去除系统误差后的面形精度达到了 0.010λ -RMS,如图 8 所示。

图 8 非球面的最终加工结果(RMS=0.010 λ)Fig. 8 Final fabrication results of aspherical surface (RMS=0.010 λ)

参考文献:

- [1] 刘振宇,李龙响,曾雪峰,等.大口径非球面反射镜误差分离组合加工技术[J].光学精密工程,2017,25(4):281-287.
LIU ZH Y, LI L X, ZENG XU F, *et al.*. Fabrication of large aspheric mirror using multi-mode polishing based on error separation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(4):281-287. (in Chinese)
- [2] 王小勇.空间光学技术发展展望[J].航天返回与遥感,2018,39(4):79-86.
WANG X Y. Development and prospect of space optical technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018,39(4):79-86. (in Chinese)
- [3] 郭疆,朱磊,赵继,等.大口径空间反射镜大容差支撑结构设计及优化[J].光学精密工程,2019,27(5):1138-1145.
GUO J, ZHU L, ZHAO J, *et al.*. Design and optimize of high tolerance support structure for large aperture space mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019,27(5):1138-1145. (in Chinese)
- [4] 张琬,叶璐,张金平,等.1.2 m轻量化空间反射镜的重力支撑变形分离[J].光子学报,2018,47(7):0722002-1-0722002-6.

5 结 论

在现代化数控光学加工工艺中,检测精度直接决定了大口径空间非球面反射镜的极限加工精度。在通常的干涉检测结果中包含了制造环境中的重力变形误差、环境等各项误差源。旋转法检测是一种简单易行的高精度检测方法,本文结合一块 $\Phi 1\ 290\ \text{mm}$ ULE材料的非球面反射镜加工实例,给出了工艺实施环节的控制方法;首先采用了3次旋转法对检测结果进行处理,主镜面形精度收敛至 0.029λ -RMS;同时由于应用旋转法而导致镜面上的对称性误差累积放大,专门进行了针对性去除,面形精度进一步收敛至 0.023λ -RMS;然后,采用了6次旋转法对检测结果进行处理并指导光学加工,最终主镜6个角度下的实测面形精度为 0.012λ -RMS,去除系统误差后的面形精度达到了 0.010λ -RMS,该面形可以认为是卫星入轨后零重力空间环境下的主镜面形。

- ZHANG L, YE L, ZHANG J P, *et al.*. Gravity and support error of separation of 1.2 m lightweight space mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(7):0722002-1-0722002-6. (in Chinese)
- [5] 宋伟红,伍凡,侯溪.基于单次旋转的旋转非对称面形误差绝对检测技术研究[J].光学学报,2012,32(8):0812006_1-0812006-6.
SONG W H, WU F, HOU X. Study on the absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation with the method of single rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012,32(8):0812006-1-0812006-6. (in Chinese)
- [6] CHRIS J E, ROBERT N K. Test optics error removal [J]. *Appl. Opt.*, 1996,35(7):1015-1021.
- [7] KLAUS R F. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear [J]. *Appl. Opt.*, 2001,40(10):1637-1648.
- [8] MARUIZIO V, GIUSEPPE M. Iterative algorithm for three flat tests [J]. *Opt. Express*, 2007,15(11):6809-6816.
- [9] PARKS P E. Removal of test optics errors [J]. *SPIE*, 1978, 153:56-63.
- [10] 王昀,李凌,谷振宇,等.“高分四号”卫星相机镜头像质检验技术[J].航天返回与遥感,2016,37(4):80-86.
WANG Y, LI L, GU ZH Y, *et al.*. Image quality

- checkout technique for optical camera of GF-4 satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(4):80-86. (in Chinese)
- [11] 杨利伟,李志来,薛栋林,等.应用方位反向技术提取反射镜零重力面形 [J]. *中国光学*, 2016, 9(5): 606-612.
YANG L W, LI ZH L, XUE D L, *et al.*. Extracting zero-gravity surface figure of mirror by orientation reversal [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(5): 606-612. (in Chinese)
- [12] 张艳微,苏东奇,隋永新,等.基于旋转平均补偿算法的旋转非对称面形绝对检测 [J]. *中国激光*, 2014, 41(7):0708007-1-0708007-6.
ZHANG Y W, SU D Q, SUI Y X, *et al.*. Absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation with the method of rotation-averaging and compensation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0708007-1-0708007-6. (in Chinese)
- [13] 韩冬松,何昕,魏仲慧,等.应用高精度旋转法的干涉仪检测误差校正 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5):1297-1303.
HAN D S, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Error correction of interferometer detection with high-accuracy rotation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1297-1303. (in Chinese)

作者简介:



孟晓辉(1985—),男,河北灵寿人,高级工程师,2010年于中科院南京天文光学技术研究所获得硕士学位,主要从事光学超精密制造及检测等工作的研究。
E-mail: mrmeng_508@163.com



王永刚(1982—),男,江苏盐城人,研究员,2010年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事大口径空间反射镜超精密制造及高精度测试技术的研究。
E-mail: vangernh@126.com