

基于光学性能评价自由曲面离轴三反系统 加工误差分析

刘现磊, 张效栋, 徐航宇, 曾 臻

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津微纳制造工程技术中心, 天津 300072

摘要 超精密加工过程存在的加工误差影响着器件的面形误差, 进而影响光学性能。制造者往往从面形精度方面来评价加工精度, 但是光学性能才是光学系统的最终评价指标, 仅仅关注加工过程中加工误差对单个面的面形误差影响是不够的, 加工误差对系统光学性能的影响需要进一步研究。基于多体系统理论和光线追迹理论建立了加工误差影响分析模型, 探索了加工误差对面形误差和光学性能的影响, 得出了系统主要的面形误差形式及其对系统调制传递函数(MTF)的影响关系, 并根据系统对光学性能的要求得出了加工误差、面形误差和角度公差, 从而找到了影响三反系统光学性能的重点加工误差, 研究结果可为离轴三反系统加工误差的控制及光学质量可控制造的实现提供理论指导。

关键词 测量; 制造公差; 加工误差; 光学性能; 面形误差; 离轴三反系统; 调制传递函数

中图分类号 TH161+.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0812005

Machining Error Analysis of Freeform Surface Off-Axis Three-Mirror System Based on Optical Performance Evaluation

Liu Xianlei, Zhang Xiaodong, Xu Hangyu, Zeng Zhen

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,

Centre of MicroNano Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract There are many machining errors in the ultra-precision machining process that affect the surface-shape error of devices, so they also affect the optical performance. Manufacturers always evaluate machining accuracy based on surface form accuracy. But optical performance is the final evaluated index for the optical system, so it is insufficient to evaluate the effect of the machining error on the surface-shape error of only one mirror in machining process. The effect of machining error on optical performance needs further research. Analysis model of machining error influence is established based on the multi-body system theory and the optical ray tracing theory. The effect of the machining errors on the surface-shape error and the optical performance is researched. The main form of the surface-shape error in the system and its influences on modulation transfer function (MTF) are obtained. Then, the tolerance of the machining errors, main surface-shape error and angle error are obtained based on the requirements of optical performance. The main machining errors are found, which affect the optical performances of three-mirror system. The results provide a theoretical support to the control of the main machining errors and the realization of the performance-controllable manufacture for the off-axis three-mirror system.

Key words measurement; fabrication tolerance; machining error; optical performance; surface-shape error; off-axis three-mirror system; modulation transfer function

OCIS codes 120.4820; 080.2208; 120.6650

收稿日期: 2017-02-10; 收到修改稿日期: 2017-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(51375337, 61635008)

作者简介: 刘现磊(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事超精密加工工艺、光学自由曲面测量方面的研究。

E-mail: liuxianlei0822@163.com

导师简介: 张效栋(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学自由曲面设计及应用、复杂光学器件超精密加工机理、硬脆材料加工工艺、超精密原位测量等方面的研究。E-mail: zhangxd@tju.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

离轴三反光学系统具有高分辨率、质量轻、无遮挡等优点,同时兼顾长焦距与大视场,可以优化为零畸变、低场曲的光学系统,很好地满足了空间对地遥感、红外系统多波段探测等领域的要求,在军用及民用方面应用越来越广泛,目前已经成为研究热点。部分研究学者采用自由曲面设计反射镜^[1-3]或提出新的设计方法^[4-6]来提高系统光学性能,增大了视场;还有部分学者设计了主镜、三镜一体的结构减少了制造与装配的困难^[7-9];也有部分研究学者就系统装配误差对光学性能的影响进行分析研究^[10-11]。可以发现目前有关三反系统的研究主要集中于系统的设计和装配环节,但是要实现离轴三反系统的最终应用,制造是必不可少的环节,而关于离轴三反系统制造方面的研究相对较少。尤其是离轴三反系统反射镜尺寸较大,制造时间长,精度要求越来越高,因此其制造过程需要重点关注。

众所周知,光学器件的制造过程会不可避免地受到机床几何误差、刀具误差、热误差、切削力误差的影响,尤其是机床几何误差和刀具误差所占的比重大,严重影响着器件的加工精度^[12]。由于离轴三反系统尺寸大,面形复杂,加工过程中加工误差引起的面形变化形式也多种多样,严重地影响其加工精度及加工效率。为了提高加工精度和避免二次补偿加工,需要预先预测重点加工误差及其公差,并对加工误差进行合理的控制和补偿。另外,在先前的研究中发现,相同峰谷(PV)值分布情况不同的面形误差造成光学器件的光学性能不同^[13],故在加工过程中仅评价面形误差是不够的,还需要分析误差对整体光学性能的影响。光学性能是光学自由曲面器件制造过程及应用过程中的最终评价指标,部分学者已认识到光学性能评价的重要性,并开展了加工表面质量对光学性能影响的研究^[14-16],但是以上研究没有建立加工与光学性能的直接联系,尤其是自由曲面面形误差的形式多样,仅建立其与光学性能的关系无法直接指导加工进而控制光学性能,因此,需要研究加工与光学性能的直接联系。

目前,商业光学设计软件可进行系统装配误差(位置误差与角度误差)及其公差的分析,对于传统面形,即球面和非球面,由于其面形误差形式特定单一,软件可以给出其面形精度的公差要求。但对于光学自由曲面,其面形误差复杂多样,软件很难分析出光学自由曲面的面形精度及其公差,也无法给出加工过程中的加工误差公差。故本文将以离轴三反系统为研究对象,其中主、三镜均采用光学自由曲面设计,将加工误差模型与光学系统模型相结合,提出了一种基于光学性能评价的重点加工误差分析方法,研究加工误差对系统光学性能的影响,得出光学自由曲面主要的面形误差形式,并基于光学性能评价找出光学自由曲面可容许的面形误差及加工误差公差范围,为离轴三反系统的超精密车削重点加工误差控制提供理论指导。同时根据实际加工经验,针对在加工或者装配过程中存在反射镜角度误差的问题,按照系统调制传递函数(MTF)的要求统计了3个反射镜的角度公差,为系统的装配提供理论指导。

2 加工误差影响分析模型的建立

所研究的离轴三反系统的离轴反射镜采用一种坐标变换加工方法^[17]进行逐个加工,即在反射镜加工时采用了一个带倾斜角的夹具固定工件,以减小反射镜一部分矢高差,如图1所示,该方法解决了离轴反射镜

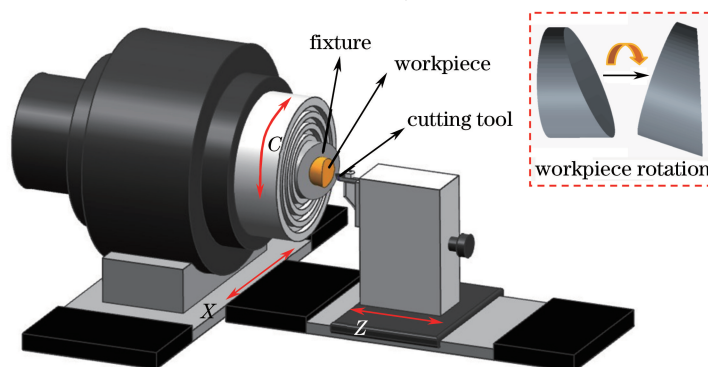


图1 超精密三轴机床示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ultra-precision three-axis machine

矢高差大、加工难的问题。采用的超精密车床结构为传统 T 型结构三轴机床,包括两个直线运动轴 X、Z 和一个回转主轴 C。该加工采用慢刀伺服控制系统,工件固定在 C 轴上进行高精度编码控制转动,并随着 X 平动轴进给,金刚石刀具固定在直线轴 Z 上,三轴联动实现非回转对称复杂器件的加工。

所研究的超精密三轴机床存在 21 项几何误差,另外在加工过程中还存在 X、Y、Z 三个方向的刀具对正误差,故共 24 项加工误差,如表 1 所示。其中, δ_{mn} 代表平动误差, θ_{mn} 代表角度误差,第一个下角标 m 代表移动轴(比如 X、Z 和 C 轴),第二个下角标 n 代表平动误差的方向或角度误差所旋转的轴(比如 X、Z 和 C 轴)。 α_{zx} 、 β_{cx} 和 β_{cy} 分别代表 X 与 Z 轴、X 轴与 C 轴轴线和 Y 轴与 C 轴轴线的垂直度误差。 X_t 、 Y_t 和 Z_t 分别代表在 X、Y 和 Z 三个方向的刀具对正误差。

表 1 超精密三轴机床的几何误差和刀具误差

Table 1 Geometric errors and tool errors of ultra-precision three-axis machine

Axis	Error item
X axis	$\delta_{xx}, \delta_{xy}, \delta_{xz}, \theta_{xx}, \theta_{xy}, \theta_{xz}$
Z axis	$\delta_{zx}, \delta_{zy}, \delta_{zz}, \theta_{zx}, \theta_{zy}, \theta_{zz}$
C axis	$\delta_{cx}, \delta_{cy}, \delta_{cz}, \theta_{cx}, \theta_{cy}, \theta_{cz}$
Squareness errors among three axes	$\alpha_{zx}, \beta_{cx}, \beta_{cy}$
Tool alignment errors among three axes	X_t, Y_t, Z_t

超精密车削加工误差影响分析模型的建立流程如图 2 所示,主要包括输入模块、加工误差分析模型模块和输出模块,首先根据待加工面的加工方法选择合适的加工参数如转速 s 、进给 f 及刀鼻半径 r 等,并根据待加工面的设计模型获得理想加工路径数据点;然后,将加工误差和理想加工路径数据点代入到加工误差模型^[18]中,从而获得实际加工路径数据点,根据实际的加工路径和设计模型获得各个加工误差引起的面形误差情况;最后将加工误差引起的面形误差代入理想光学系统模型的设计表面中,将新表面替换已有设计表面,利用光线追迹理论,得出各个加工误差对光学性能参数的影响,得到光学自由曲面对应的主要面形误差形式,并基于光学性能评价来确定各个加工误差公差及重点加工误差项,从而为实现基于光学性能评价的重点加工误差的控制或补偿提供强有力的理论支撑。

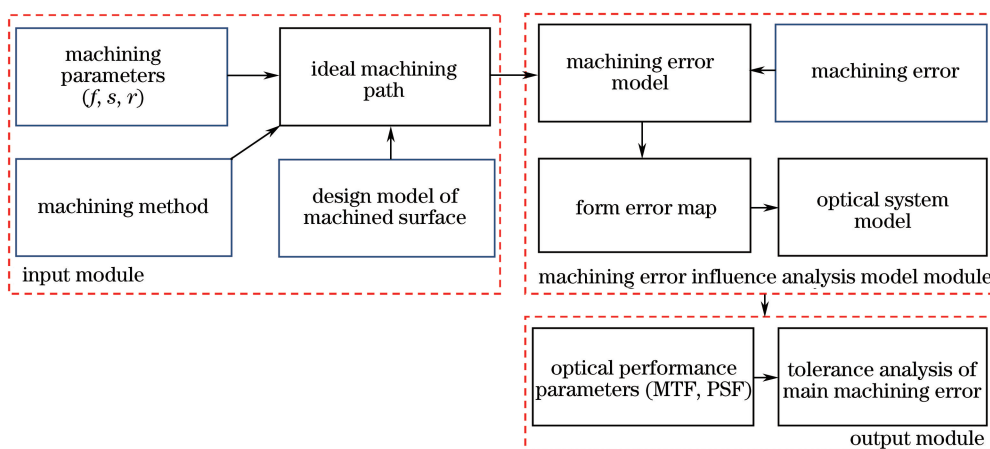


图 2 超精密机床加工误差影响分析模型流程图

Fig. 2 Flowchart of machining error influence analysis model of ultra-precision machine

图 2 中误差分析模型模块是其中关键环节,误差分析模型模块包括两个模型,一是基于多体系统及齐次坐标变换矩阵建立的加工误差模型^[12],具体流程如下:1)根据加工系统轴系关系建立该机床的拓扑机构;2)根据机床的拓扑结构,采用低序体阵列描述各部件之间的关联关系;3)采用齐次坐标变换矩阵表示各部件之间的几何特征;4)根据各部件齐次坐标变换矩阵之间的关系,计算出刀具在工件坐标系中的姿态和位置坐标,从而建立实际刀具切削运动,完成超精密机床加工误差建模。二是基于光线追迹理论建立的光学系统模型^[19],具体流程如下:1)利用光传播满足的 4 个定律,即光的直线传播定律、光的独立传播定律和光线经过两种均匀介质分界面的传播定律——折射和反射定律对光线从入瞳位置进行追迹;2)根据入射光线和曲面

方程计算与曲面的交点及折射或者反射光线的方向向量;3)根据等光程原理,计算各条光线经过折射或者反射后等光程点,对数据点进行插值拟合,求得对应的波前;4)将求得的实际波前与理想波前作差,求得此时的波前像差,进一步得到系统的点扩展函数(PSF)和 MTF。

目前设计和测量方面主要评价的光学性能参数有波前像差、PSF 和 MTF。波前像差定义为实际波前与理想波前之间的差,波前像差的 PV 值和均方根(RMS)值越小,系统的光学性能越好。PSF 表示一个理想的点光源经过光学系统后在像面上的光强分布函数,用来衡量重建后的图像分辨率,光斑能量越集中表示光学性能越好。MTF 表示每毫米分辨出的线对数,即成像的调制度随空间频率变化的函数,反映光学系统成像的空间分辨能力,曲线越接近于 1,表示成像质量越好。通过调研发现各个光学性能参数之间可以相互转化,如图 3 所示,评价出其中一个参数,其他参数可以通过转化关系计算得出。

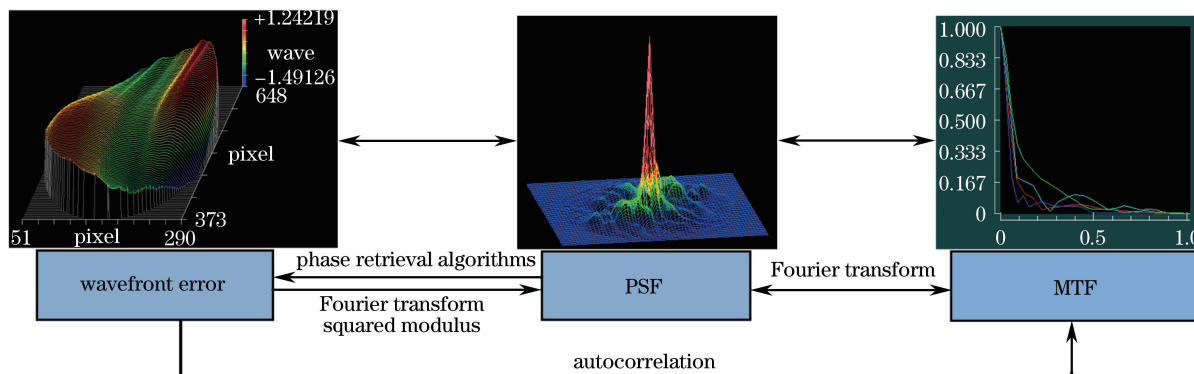


图 3 不同光学性能指标之间的转换关系

Fig. 3 Conversion relationship between different optical performance indexes

波前像差适合评价小像差系统,PSF 适合评价大像差系统,而 MTF 反映系统的空间分辨能力,是所有光学系统性能判断中最全面的判据,适用于所有光学系统,因此主要通过评价光学系统的 MTF 进行加工误差分析。

3 离轴三反系统加工误差分析

所研究的离轴三反系统如图 4 所示,为了更好地改善离轴像差,主镜和三镜均采用自由曲面设计,次镜采用非球面设计,其尺寸分别为 150 mm×150 mm,60 mm×60 mm,115 mm×115 mm。将各个加工误差代入加工误差影响分析模型,可以得出三个自由曲面反射镜的主要面形误差形式如图 5(a)所示。根据三种面形误差形式可以将主要加工误差分为以下三类: X 对刀误差(X_1)和 X 轴与 C 轴轴线的垂直度误差(β_{cx}),统称为 error 1;Y 对刀误差(Y_1)和 X 轴角偏差误差(θ_{xy}),统称为 error 2;X 轴与 Z 轴的垂直度误差(α_{zx}),称为 error 3。其中,对于次镜,主要面形误差形式为第一类和第三类。

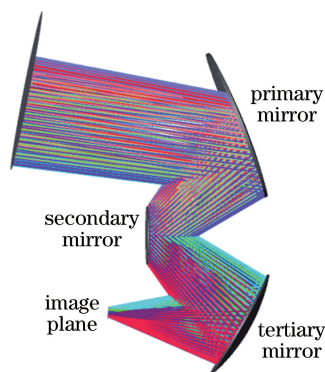


图 4 离轴三反系统模型图

Fig. 4 Model diagram of off-axis three-mirror system

为了得到各个加工误差及其面形误差的公差,需要设置不同的加工误差量。根据不同的加工误差量得到不同 PV 值的面形误差并代入光学系统模型的设计表面中,从而可以得到不同 PV 值的面形误差及三反系统光学性能的变化。

将不同数值的加工误差代入误差分析模型中,首先可以得到加工误差和面形误差 PV 值的关系为线性的,其比例关系如表 2 所示;其次可以得到该加工误差对系统的子午和弧矢 MTF 影响变化图如图 5(b)和(c)所示。由前文分析可知几种加工误差项引起的面形误差形式一样,而各加工误差与面形误差的比例关系已知,为了避免重复画图,故图中横坐标就用面形误差 PV 值表示,纵坐标表示 MTF 数值,不同颜色曲线分别代表不同视场的 MTF 随面形误差的变化,其中较粗的红色曲线表示平均 MTF 变化情况。同理可以得到其他两个自由曲面的加工误差对光学性能的影响,如图 6 和图 7 所示。由仿真图可知,error 1 和 error 3 对子午和弧矢 MTF 的影响较大,这是因为这两项加工误差在子午和弧矢方向(子午对应 $X=0$,弧矢对应 $Y=0$)上引起的面形误差或者波前像差 PV 变化比 error 2 的影响大,如图 4(a)所示;子午 MTF 随面形误差的变化起伏较大,受面形误差的影响大于弧矢方向,这是因为子午方向反射镜面形曲率变化和 PV 变化较大。

表 2 加工误差与面形误差比值

Table 2 Ratio of machining errors to surface-shape errors

Error	Primary mirror	Secondary mirror	Tertiary mirror
Tool alignment error in X direction	1.915052	1.558613	0.490417
Squareness error between X and C axis	0.000175	0.000461	0.000245
Tool alignment error in Y direction	10.847730	/	2.868905
Pitch error of X axis	0.005656	/	0.003096
Squareness error between X and Z axis	0.029297	0.053046	0.003486

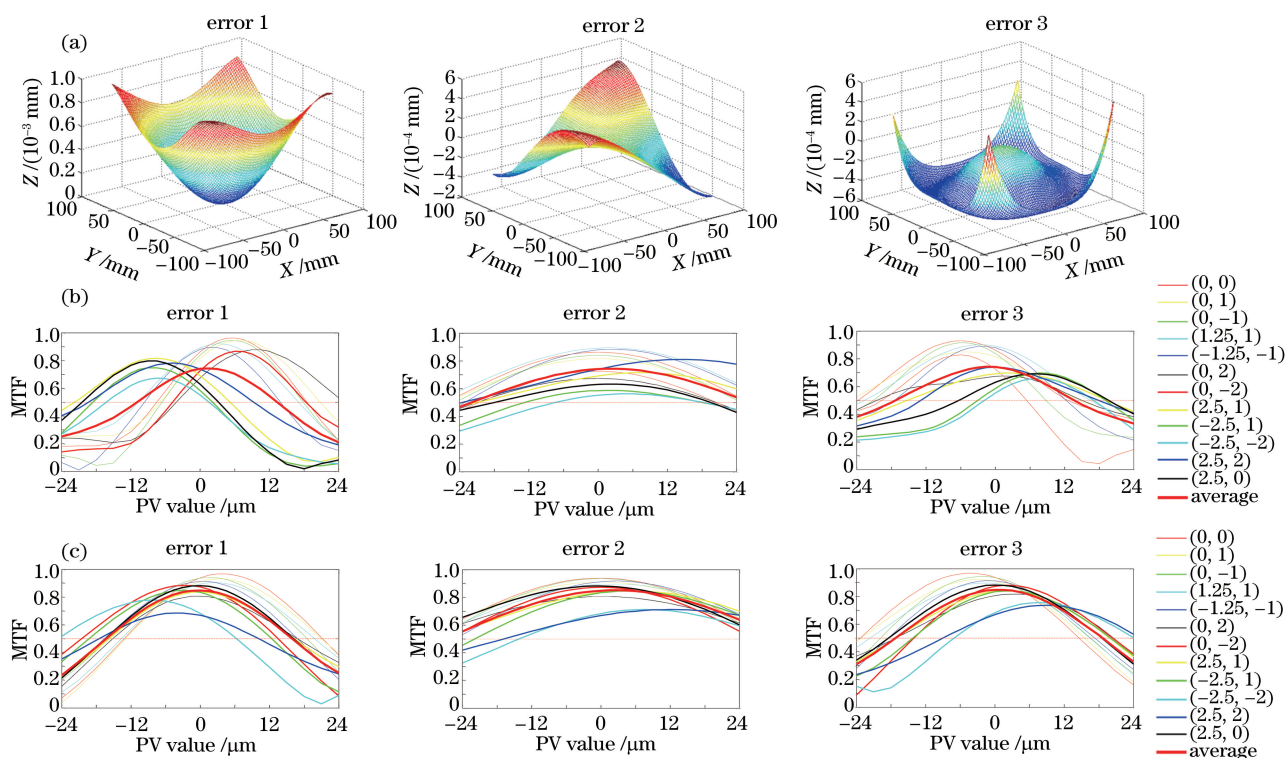


图 5 主镜面形误差及其对 MTF 的影响。(a)面形误差图;(b)子午 MTF 随面形误差 PV 变化图;
(c)弧矢 MTF 随面形误差 PV 变化图

Fig. 5 Surface-shape error and its effect on MTF for primary mirror. (a) Surface-shape error map;
(b) variation diagram of meridional MTF with PV value of surface-shape error;
(c) variation diagram of sagittal MTF with PV value of surface-shape error

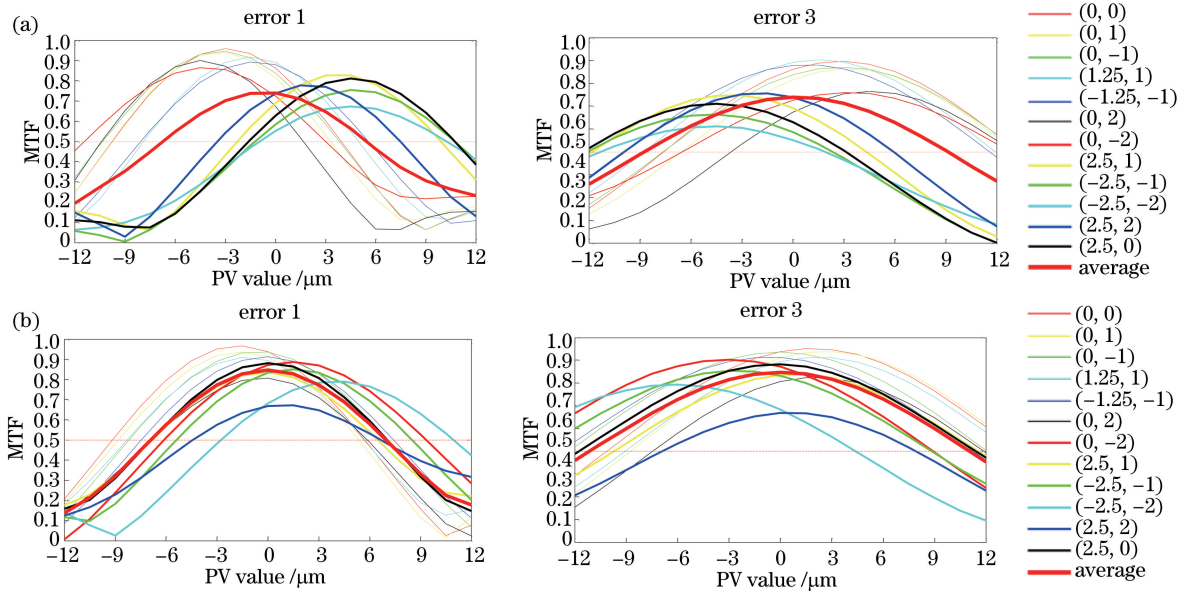


图 6 次镜加工误差对 MTF 的影响。(a)子午 MTF 随面形误差 PV 变化图;(b)弧矢 MTF 随面形误差 PV 变化图
 Fig. 6 Machining errors' effect on MTF for secondary mirror. (a) Variation diagram of meridional MTF with PV value of surface-shape error; (b) variation diagram of sagittal MTF with PV value of surface-shape error

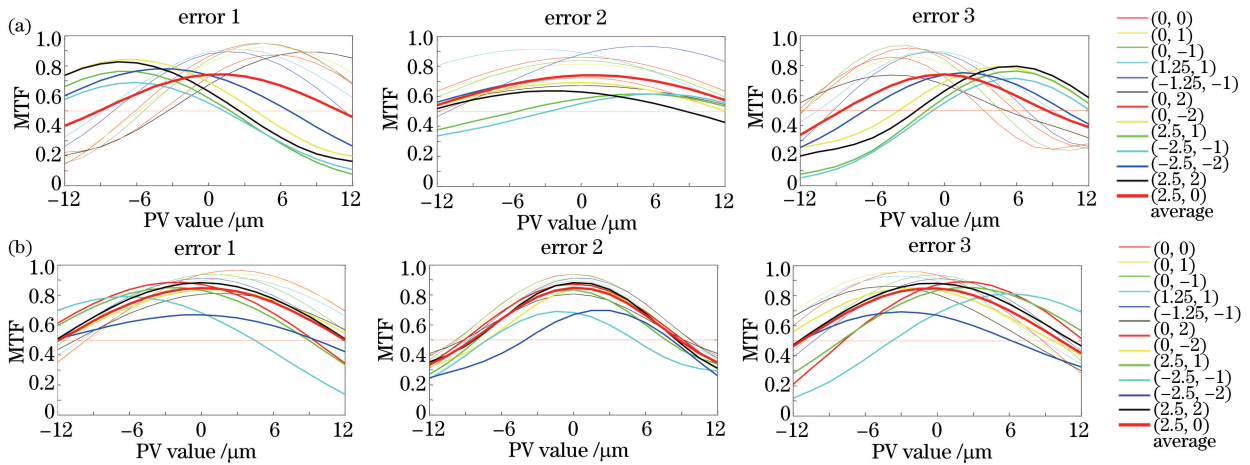


图 7 三镜中加工误差对 MTF 的影响。(a)子午 MTF 随面形误差 PV 变化图;(b)弧矢 MTF 随面形误差 PV 变化图
 Fig. 7 Machining errors' effect on MTF for tertiary mirror. (a) Variation diagram of meridional MTF with PV value of surface-shape error; (b) variation diagram of sagittal MTF with PV value of surface-shape error

基于加工误差影响分析模型得到加工误差、面形误差及其与 MTF 之间的关系,可以根据图 5~7 的面形误差和 MTF 的曲线变化得到满足系统性能要求的面形误差 PV 公差,如图 5~7 中红色虚线所示为 $V_{MTF}=0.5$ 的直线,在直线以上对应的面形误差 PV 变化均满足系统要求,从而得到面形误差 PV 公差,再根据表 2 中加工误差与面形误差 PV 值之间的比例关系,得到加工误差公差。三个反射镜满足系统 MTF 要求的面形误差 PV 公差和加工误差公差如表 3~5 所示,第二列为面形误差公差,第三列为加工误差公差。对于光学自由曲面,目前商业仿真软件是无法给出这些公差参数的,而建立误差分析模型可以给出。

从表 3~5 的数据可以看出,三个自由曲面反射镜加工时,X 方向对刀误差和 X 轴与 C 轴轴线的垂直度的公差较小,故重点加工误差为 X 向对刀误差和 X 轴与 C 轴的垂直度误差,在加工时需要重点控制和补偿,尤其是三镜对这两项误差的要求更为严格,需要将刀误差控制在 $-1.651\sim 0.619\ \mu\text{m}$ 范围内。

表 3 主镜的面形误差 PV 公差和加工误差公差

Table 3 Tolerances of surface-shape errors' PV values and machining errors for primary mirror

Error item	Tolerance of surface-shape errors' PV values / μm	Tolerance of machining errors
Error 1	-4.026-1.069	$X_1: -7.71-2.981 \mu\text{m}$ $\beta_{cx}: -0.000703^\circ-0.000274^\circ$
Error 2	-7.467-18.185	$Y_1: 81-197 \mu\text{m}$ $\theta_{xy}: 0.042237^\circ-0.102920^\circ$
Error 3	-1.836-5.524	$\alpha_{zx}: -0.053667^\circ-0.161528^\circ$

表 4 次镜的面形误差 PV 公差和加工误差公差

Table 4 Tolerances of surface-shape errors' PV values and machining errors for secondary mirror

Error item	Tolerance of surface-shape errors' PV values / μm	Tolerance of machining errors
Error 1	-0.981-1.656	$X_1: -1.529-2.581 \mu\text{m}$ $\beta_{cx}: -0.000452^\circ-0.000763^\circ$
Error 3	-3.624-1.899	$\alpha_{zx}: -0.192242^\circ-0.102832^\circ$

表 5 三镜的面形误差 PV 公差和加工误差公差

Table 5 Tolerances of surface-shape errors' PV values and machining errors for tertiary mirror

Error item	Tolerance of surface-shape errors' PV values / μm	Tolerance of machining errors
Error 1	-3.369-1.263	$X_1: -1.651-0.619 \mu\text{m}$ $\beta_{cx}: -0.000826^\circ-0.000310^\circ$
Error 2	-4.020-5.121	$Y_1: -11.553-14.717 \mu\text{m}$ $\theta_{xy}: 0.012449^\circ-0.015859^\circ$
Error 3	-0.975-3.274	$\alpha_{zx}: -0.003399^\circ-0.011379^\circ$

另外离轴三反系统由三个反射镜组成,不管是加工过程还是装配过程,都会在系统使用中引入角度误差,故也针对角度误差所导致的成像质量变化作了系统分析。图 8 是三个自由曲面表面存在不同的角度误差,

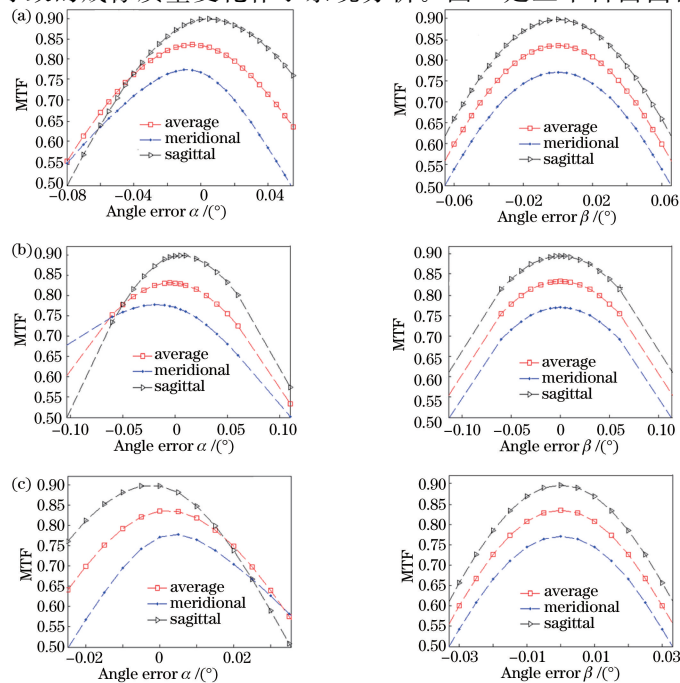


图 8 角度误差对系统 MTF 的影响。(a)主镜角度误差对系统 MTF 的影响;(b)次镜角度误差对系统 MTF 的影响;(c)三镜角度误差对系统 MTF 的影响

Fig. 8 Effects of angle errors on MTF of the system. (a) Effects of angle errors of the primary mirror on MTF of the system; (b) effects of angle errors of the secondary mirror on MTF of the system; (c) effects of angle errors of the tertiary mirror on MTF of the system

差时,MTF 值的变化。其中 α 角为反射镜绕 X 轴旋转的角度, β 角为反射镜绕 Y 轴旋转的角度(顺时针旋转为正,逆时针旋转为负)。在频率为 25 Hz 处,当 $V_{\text{MTF}} > 0.5$ 时,主镜的角度公差为 $-0.08^\circ \sim 0.0538^\circ$,次镜的角度公差为 $-0.1041^\circ \sim 0.111^\circ$,三镜的角度公差为 $-0.0247^\circ \sim 0.0355^\circ$ 。

从公差分析的统计数据可以看出,系统不同反射镜的角度变化对 MTF 数值会有不同程度的影响。对于主镜的 α 角,负的角度公差($\alpha < 0$)对 MTF 的影响大于正的角度公差($\alpha > 0$)对 MTF 的影响。在 $\alpha = -0.01^\circ$ 时,MTF 有所上升,达到最高点,即主镜负 α 角对系统子午 MTF 的下降有抑制作用,同样,三镜正 α 角对系统子午 MTF 的下降有抑制作用;三镜的角度公差最小,即三镜的角度变化对系统的 MTF 影响最大,在加工和装配时需要重点控制。

4 结 论

基于加工误差模型和光学系统模型建立了加工误差影响分析模型,探索了各个加工误差对光学性能的影响,得出了自由曲面离轴三反系统各个反射镜的主要面形误差形式。另外,根据光学系统设计要求得出了加工误差和面形误差公差,最终得出采用超精密车削方式加工该自由曲面离轴三反系统的重点加工误差为 X 向对刀误差和 X 轴与 C 轴轴线的垂直度误差。其中,三镜对于这两项误差的要求最严格。这为离轴三反系统加工误差的控制和补偿提供理论基础,也为其他器件加工误差的控制提供了新的评价方法及途径。同时,根据统计的角度公差得出三镜的公差范围小,在装配时需要重点控制。

参 考 文 献

- [1] Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2813-2820.
薛栋林, 郑立功, 张 峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12): 2813-2820.
- [2] Yang T, Zhu J, Hou W, *et al.* Design method of freeform off-axis reflective imaging systems with a direct construction process[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9193-9205.
- [3] Chen Wei, Xue Chuang. Design of wide field-of-view off-axis three-mirror telescope for imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(8): 950-955.
陈 伟, 薛 闯. 用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计[J]. 光子学报, 2013, 42(8): 950-955.
- [4] Gong G B, Wei J, Shen W M. Design of off-axis three-mirror system with Zernike surface[C]. SPIE, 2010, 7544: 754441.
- [5] Hou W, Zhu J, Yang T, *et al.* Construction method through forward and reverse ray tracing for a design of ultra-wide linear field-of-view off-axis freeform imaging systems[J]. Journal of Optics, 2015, 17(5): 055603.
- [6] Chen Zhe, Zhang Xingxiang, Chen Changzheng, *et al.* Coaxial and off-axial hybrid three-mirror optical system with long focal length[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0416002.
陈 哲, 张星祥, 陈长征, 等. 长焦距同轴混合式三反光学系统[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0416002.
- [7] Zhu J, Hou W, Zhang X D, *et al.* Design of a low F -number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view[J]. Journal of Optics, 2014, 17(1): 015605.
- [8] Meng Q Y, Wang W, Ma H C, *et al.* Easy-aligned off-axis three-mirror system with wide field of view using freeform surface based on integration of primary and tertiary mirror[J]. Applied Optics, 2014, 53(14): 3028-3034.
- [9] Gao Duorui, Hu Hui, Wang Wei, *et al.* Optical design for a kind of simply processed and installed off-axis three-reflection[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0616001.
高铎瑞, 胡 辉, 汪 伟, 等. 一种改进的易于加工、装调的离轴三反光学系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0616001.
- [10] Pang Zhihai. Study on computer aided alignment technology for off-axis optical system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
庞志海. 离轴反射光学系统计算机辅助装调技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.
- [11] Wang Hong, Hu Zhong. Tolerance analysis and research of multispectral optical imaging system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(4): 67-71.
王 红, 胡 忠. 多光谱相机光学系统公差分析与研究[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(4): 67-71.
- [12] Li Shengyi, Dai Yifan, Yin Ziqiang. Precision and ultra precision machine tool accuracy modeling technology[M].

Changsha: National University of Defense Technology Press, 2007.

李圣怡, 戴一帆, 尹自强. 精密和超精密机床精度建模技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.

- [13] Liu X L, Zhang X D, Fang F Z, *et al.* Influence of machining errors on form errors of microlens arrays in ultra-precision turning[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 96: 80-93.
- [14] Tamkin J M, Milster T D, Dallas W. Theory of modulation transfer function artifacts due to mid-spatial-frequency errors and its application to optical tolerancing[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): 4825-4835.
- [15] Lawson J K, Aikens D M, English Jr R E, *et al.* Power spectral density specifications for high-power laser systems [C]. *SPIE*, 1996, 2775: 345-356.
- [16] Tian Fei, Liu Xianlei, Zhang Xiaodong, *et al.* Influence of manufacture error on optical performance of micro lens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0222002.
田 霏, 刘现磊, 张效栋, 等. 微透镜阵列加工误差对光学性能的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0222002.
- [17] Zhang X D, Fang F Z, Wu Q Q, *et al.* Coordinate transformation machining of off-axis aspheric mirrors [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(9/12): 2217-2224.
- [18] Liu X, Zhang X, Fang F, *et al.* Identification and compensation of main machining errors on surface form accuracy in ultra-precision diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016, 105: 45-57.
- [19] Yudaoyin, Tan Hengying. *Engineering optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.