

基于统一场追迹理论的激光扫描系统公差分析

高慧敏¹, 房丰洲¹, 张效栋^{1*}, 李楠²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津市微纳制造技术工程中心, 天津 300072;

²天津航海仪器研究所, 天津 300131

摘要 激光扫描系统广泛应用于激光加工和激光成像等高精度系统中,其光学质量是制造过程最终的评价指标。在批量生产中,需要对光学系统进行公差分析,以满足使用需求,同时降低加工成本。以激光扫描系统为例,采用统一场光学分析对该光学系统进行仿真,结合激光扫描系统的光学性能,对系统各个元件间的位置误差和旋转误差进行公差分析。通过对每个元件进行公差约束,使整体系统满足设计和使用需求。搭建激光扫描系统的测量平台,验证了测量结果与统一场分析的一致性。

关键词 测量; 激光扫描系统; 公差分析; 统一场追迹理论; 光学性能

中图分类号 O439; TN202 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.121203

Tolerance Analysis of Laser Scanning System Based on Unified Field Tracing Theory

Gao Huimin¹, Fang Fengzhou¹, Zhang Xiaodong¹, Li Nan²

¹Centre of MicroNano Manufacturing Technology, State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Tianjin Navigation Instruments Research Institute, Tianjin 300131, China

Abstract Laser scanning system is widely used in high precision systems, such as laser machining and imaging. The optical quality is the final index of manufacture process. In mass production, the tolerance analysis of the optical system is needed to meet the demand of use and reduce processing cost. For example, the laser scanning system is simulated by the unified field optical analysis. The position tolerance and rotation tolerance of each workpiece of the system is analyzed based on the optical properties of the laser scanning systems. The overall system meets the design and uses requirements through tolerance constraints for each workpiece. The measurement platform is built, and the measurement result is consistent with the analysis of unified field tracing.

Key words measurement; laser scanning system; tolerance analysis; unified field tracing theory; optical properties

OCIS codes 120.4820; 120.4610; 140.3070

1 引言

19世纪70年代末,随着半导体技术的日趋成熟,诞生了半导体激光器。同时,光学自由曲面的加工技术的成熟和量产化,使得激光扫描技术进入到实际应用领域。激光扫描是指控制可见光或不可见光的激光光束的偏移。扫描系统主要包括两个方面:控制光束偏移的运动机构和像面的光学质量控制系统。该技术

收稿日期: 2017-07-03; 收到修改稿日期: 2017-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(51320105009,61635008,51375337)、高等学校学科创新引智计划(B07014)

作者简介: 高慧敏(1988—),女,博士研究生,主要从事光学自由曲面的测量与评价方面的研究。

E-mail: xcxxhyn@hotmail.com

导师简介: 房丰洲(1963—),男,博士,教授,主要从事光学自由曲面加工、超精密加工技术及装备、微纳制造等方面的研究。E-mail: fzfang@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhangxd@tju.edu.cn

可批量用于激光加工^[1]及成像^[2]等多种技术中。在采用 F-Theta 扫描系统的远红外加工装置中,光学曲面用于降低热效应和减小鬼像,并使用高精度的定位系统减小场曲^[3]。

激光扫描系统的核心组成部分是 F-Theta 镜头, F-Theta 镜使像面的像高正比于扫描角度,一般引入桶形畸变。设计 F-Theta 镜头的关键是结合实际使用时的具体要求,建立合理的品质函数,在所要求的像平面上获得高质量的平场像点^[4]。激光扫描根据扫描位置主要分为三种形式:物镜扫描、物镜前扫描和物镜后扫描^[5]。由于本研究中的激光扫描系统的设计要求是大视场的高分辨率的平面扫描,所以选择物镜前扫描系统。随着视场的增大,轴外像差会变得难以矫正。仅采用球面或非球面已经很难达到设计要求,需要光学自由曲面的设计矫正大视场的轴外像差^[6]。同时,针对不同视场的仿真结果存在的光瞳漂移问题^[7],本研究直接采用多重结构进行解决。然而,目前对光学设计系统^[8]的公差分析^[9]主要采用光线追迹的方法,而光线追迹法存在着的主要问题为像面的仿真结果在聚焦点处与真实情况间有着较大的差别,本研究采用统一场追迹理论解决该问题。另外,目前针对 F-Theta 透镜的研究主要集中在其光学设计的结构上^[10],缺乏在使用过程中的公差分析结果,尤其缺乏针对光学自由曲面的公差分析的通用方法^[11]。

本文以激光扫描系统为例,基于像面光斑直径对每个元件进行公差约束,使得整体系统满足设计和使用需求。

2 激光扫描系统设计

激光扫描系统的光路图如图 1 所示。激光光源发出的光经过准直透镜后,以准直光射向柱面镜,该柱面镜对准直光进行整形,因此柱面镜被称为整形镜。经过整形镜后, X 轴方向光斑被压缩, Y 轴方向仍然准直。整形后的光线以长条形光斑入射在五棱镜表面上,这样的好处是减小五棱镜塔差和面形误差对最终成像的影响。经过五棱镜的反射后,光线进入 F-Theta 镜或同步棱镜。经过 F-Theta 镜的光线会聚到像面位置,满足像高和扫描五棱镜旋转角度之间的线性关系。经过同步棱镜的光线聚焦到光敏元件作为换行信号。

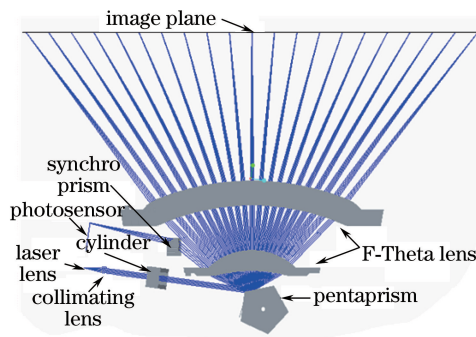


图 1 激光扫描系统的光路图

Fig. 1 Optical path of the laser scanning system

激光扫描系统的光路设计主要分为三个部分:准直整形、F-Theta 物镜和同步棱镜。

1) 准直整形光路设计

准直和整形光路主要由光源、准直透镜、光阑、整形柱面镜组成。本系统所采用的激光器为波长 780 nm 的半导体激光器,该激光器在平行和垂直方向的典型发散角分别为 8° 和 29° 。激光过准直透镜后,将球面波准直为近平面波。准直透镜是按照长轴口径设计,一面为平面,另一面为非球面,通过光线追迹优化的设计结果可以满足实际要求。光阑为矩形,限制准直后的光束入射到整形镜上的尺寸。

柱面透镜的目的是将光束在 X 轴方向压缩,聚焦到五棱镜的反射面上。为降低五棱镜塔差和面形误差对扫描光路的影响,入射到五棱镜表面的光斑尺寸在 Y 轴方向应具有一定宽度。同时,为了避免光线超出五棱镜的表面,在五棱镜表面的光斑宽度为五棱镜宽度的三分之一至十分之一比较合适。

2) F-Theta 物镜设计

本设计要求视场角度为 118° ,打印范围为 216 mm,根据 F-Theta 公式计算焦距为 $f = 104.88$ mm,不同视场角 θ 对应像面的像高值 H 可由下式计算:

$$H = f\theta, \quad (1)$$

式中 H 为半宽度, f 为焦距, θ 为半视场角度(弧度)。

为了矫正大视场所导致的轴外像差, F-Theta 物镜设计采用光学自由曲面。F-Theta 镜的桶形畸变使视场角度与扫描距离成线性关系, 光学自由曲面对轴外像差矫正具有明显的效果。该设计中 F-Theta 镜采用非球面和双锥泽尼克面。设计中利用多重结构建模设计, 避免整形光束经过五棱镜反射后所存在的入瞳漂移问题。

3) 同步棱镜设计

同步棱镜的目的是同步五棱镜每个面的信息, 对于会聚光斑要求不是很高, 采用非球面棱镜即可实现。

3 基于统一场追迹的光学仿真

现代光学系统包括大量不同类型的光学元件, 需要对这些复杂的光学元件和光源组成的系统采用有效的光学建模技术进行仿真。光线追迹理论和仿真方法在光学系统的发展中起到了重要作用, 但是光线追迹并不能展现很多真实的信息。基于不同物理光学原理的建模技术在革新性的光学元件创造中发挥着关键作用, 但是物理光学仿真往往非常耗费内存和计算时间, 无法计算较大尺寸的光学系统。本研究采用的基于统一场追迹的光学仿真软件, 通过矢量简谐波场, 同时集成了光线追迹和物理光学方法的优点。这种追迹方式能利用并提供更多的光学信息, 并且相对来说节省计算时间^[12]。

基于统一场追迹的光学仿真系统如图 2 所示, 由于存在反射元件将光路偏折, 所以像平面绕着 X 轴旋转相应角度后, 视场角度的正方向沿全局坐标系 Z 轴的负方向, 视场角度的负方向沿全局坐标系 Z 轴的正方向。像面的 Y 轴方向为光斑的扫描方向, 像面的 X 轴方向在像面上垂直于光斑扫描方向。后续对于光斑直径的 X 轴方向和 Y 轴方向的定义均与像面所定义的坐标系相同。基于光线追迹计算该光学系统在边缘视场 60° 、 -60° 和中心视场 0° 位置所得到的点列图如图 3 所示, 只能近似分析光线分布的范围, 计算所得的光斑直径在 X 和 Y 轴方向的均方根(RMS)值如表 1 所示。基于统一场追迹计算该光学系统在边缘视场 60° 、 -60° 和中心视场 0° 位置所得到的光斑图如图 4 示, 不仅可以反映光线的分布, 还可以反映光强的分布和衍射效应, 计算所得的光斑直径在 X 和 Y 轴方向的 RMS 值如表 1 所示。光线追迹在边缘视场比统一场追迹的光斑直径大, 两者在中心视场的光斑直径尺寸较为接近。通过统一场追迹计算所得结果与真实情况更为接近, 因此采用统一场追迹模型和结果来进行系统分析。

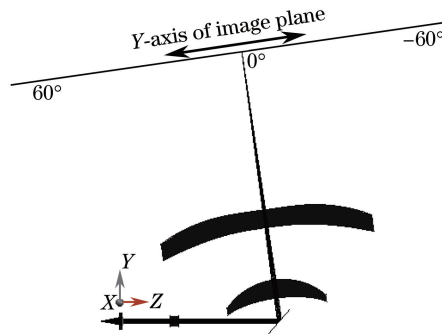


图 2 统一场光学仿真

Fig. 2 Optical simulation of unified field

表 1 光线追迹和场追迹结果对比

Table 1 Result comparison between ray tracing and field tracing

Field / ($^\circ$)	Ray tracing simulation of the beam diameter in X-axis and Y-axis / μm	Unified field tracing simulation of the beam diameter in X-axis and Y-axis / μm
60	(89.695, 66.635)	(57.426, 51.625)
0	(29.621, 20.378)	(21.872, 20.394)
-60	(94.900, 70.426)	(54.349, 31.632)

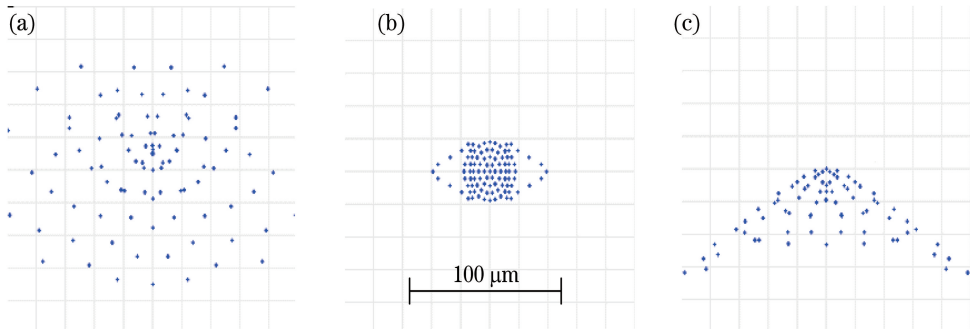


图3 光线追迹仿真得到的边缘视场和中心视场的点列图。(a) 60° ; (b) 0° ; (c) -60°

Fig. 3 Spot diagrams of edge field and center field obtained by ray tracing simulation. (a) 60° ; (b) 0° ; (c) -60°

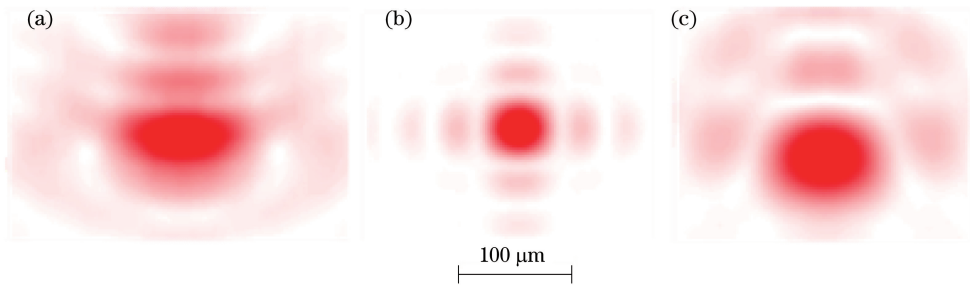


图4 场追迹仿真得到的边缘视场和中心视场光斑图。(a) 60° ; (b) 0° ; (c) -60°

Fig. 4 Spot diagrams of edge field and center field obtained by unified field tracing simulation. (a) 60° ; (b) 0° ; (c) -60°

由于激光扫描系统在像面的光斑直径将直接影响实际使用性能,因此通过场追迹方式仿真整个视场的光斑直径,如图5所示。通过仿真结果可知,整个视场的光斑直径RMS值均小于 $60\ \mu\text{m}$,中心视场比边缘视场的光学性能要好。X轴方向和Y轴方向的光斑直径RMS值最大值均在 60° 视场处。系统的公差分析可以采用 60° 视场作为分析视场,设计要求边缘视场的X轴方向和Y轴方向光斑直径的RMS值为 $80\ \mu\text{m}$ ($+25\ \mu\text{m}/-15\ \mu\text{m}$)和 $70\ \mu\text{m}$ ($+20\ \mu\text{m}/-10\ \mu\text{m}$)。考虑到公差分配和各项误差比重以及误差传递机制,在后续分析中将 60° 视场X轴方向和Y轴方向光斑直径的RMS值分别控制在 $80\ \mu\text{m}$ 和 $70\ \mu\text{m}$ 范围以内。该分析边界为光斑直径的中心值而不是上限值。

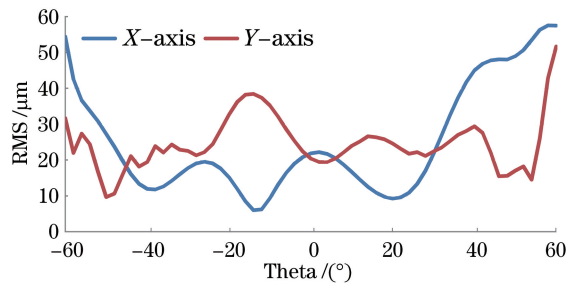


图5 场追迹仿真得到的整个视场的光斑直径RMS值

Fig. 5 Beam diameter RMS values of the whole field obtained by unified field tracing simulation

4 激光扫描系统公差分析

该光学自由曲面系统的公差分析根据元件划分为4个主要部分,分别为准直透镜、整形镜、五棱镜和F-Theta镜。本节的公差分析主要为位置公差和旋转公差。位置公差的偏移分析范围为 $\pm 0.1\ \text{mm}$,旋转公差的分析范围为 $\pm 0.1^\circ$ 。该公差范围对于实际的机加工和装调较为宽松,因此若该范围内光斑直径RMS值不能满足要求,则需要进一步考虑通过特定加工方式或后续装调工作来保证系统的整体精度。

4.1 准直透镜公差分析

准直透镜为非球面元件,因此面形绕 Z 轴旋转对称。需要考虑的位置误差为沿 X 轴的偏移、沿 Y 轴的偏移和沿 Z 轴的偏移;需要考虑的旋转误差为绕 X 轴的旋转和绕 Y 轴的旋转。位置和旋转公差对边缘视场光斑直径 RMS 值的影响及仿真结果如图 6 所示。

图 6(a)为当准直透镜存在沿 X 轴的位置误差时,边缘视场光斑直径 RMS 值的变化规律。当 X 轴位置偏差的绝对值增大时,光斑 X 轴和 Y 轴方向的直径 RMS 值均变大,且沿 X 轴方向光斑变化更剧烈。当沿 X 轴的位置误差的绝对值大于 $30\ \mu\text{m}$ 时,光斑 X 轴方向直径 RMS 值大于 $80\ \mu\text{m}$;当沿 X 轴的位置误差的绝对值大于 $50\ \mu\text{m}$ 时,光斑 Y 轴方向直径 RMS 值大于 $70\ \mu\text{m}$ 。由此可以看出,光斑直径 RMS 值对准直透镜 X 轴的位置误差非常敏感,需要将 X 轴的位置误差控制在绝对值 $30\ \mu\text{m}$ 以下。

图 6(b)为当准直透镜存在沿 Y 轴的位置误差时,边缘视场光斑直径 RMS 值的变化规律。 X 轴方向的光斑直径 RMS 值对准直透镜的 Y 轴位置误差不敏感。当准直透镜 Y 轴位置误差为正时,在 X 轴方向的光斑直径 RMS 值随偏差量的增大而缓慢增大。光斑 Y 轴方向直径 RMS 值对准直透镜 Y 轴位置误差在 $-70\sim 100\ \mu\text{m}$ 时不敏感。当准直透镜 Y 轴位置误差小于 $-70\ \mu\text{m}$ 时,光斑在 Y 轴方向直径 RMS 值显著增大。当准直透镜 Y 轴位置误差为 $70\ \mu\text{m}$ 时,光斑在 Y 轴方向直径 RMS 值为 $70\ \mu\text{m}$ 。当准直透镜 Y 轴位置误差为正且小于 $100\ \mu\text{m}$ 时,在 Y 轴方向的光斑直径 RMS 值随偏差量的增大而缓慢减小。当准直透镜 Y 轴位置误差为负时,在 Y 轴方向的光斑直径 RMS 值随偏差量的增大而增大。由此可以看出,对准直透镜 Y 轴的位置误差也需要进行一定的控制,需要将 Y 轴的位置误差控制在绝对值 $70\ \mu\text{m}$ 以下。

图 6(c)为当准直透镜存在沿 Z 轴的位置误差时,边缘视场光斑直径 RMS 值的变化规律。当 Z 轴位置偏差的绝对值增大时,光斑 X 轴和 Y 轴方向的直径 RMS 值均变大,且两者对 Z 轴位置偏差的敏感度基本

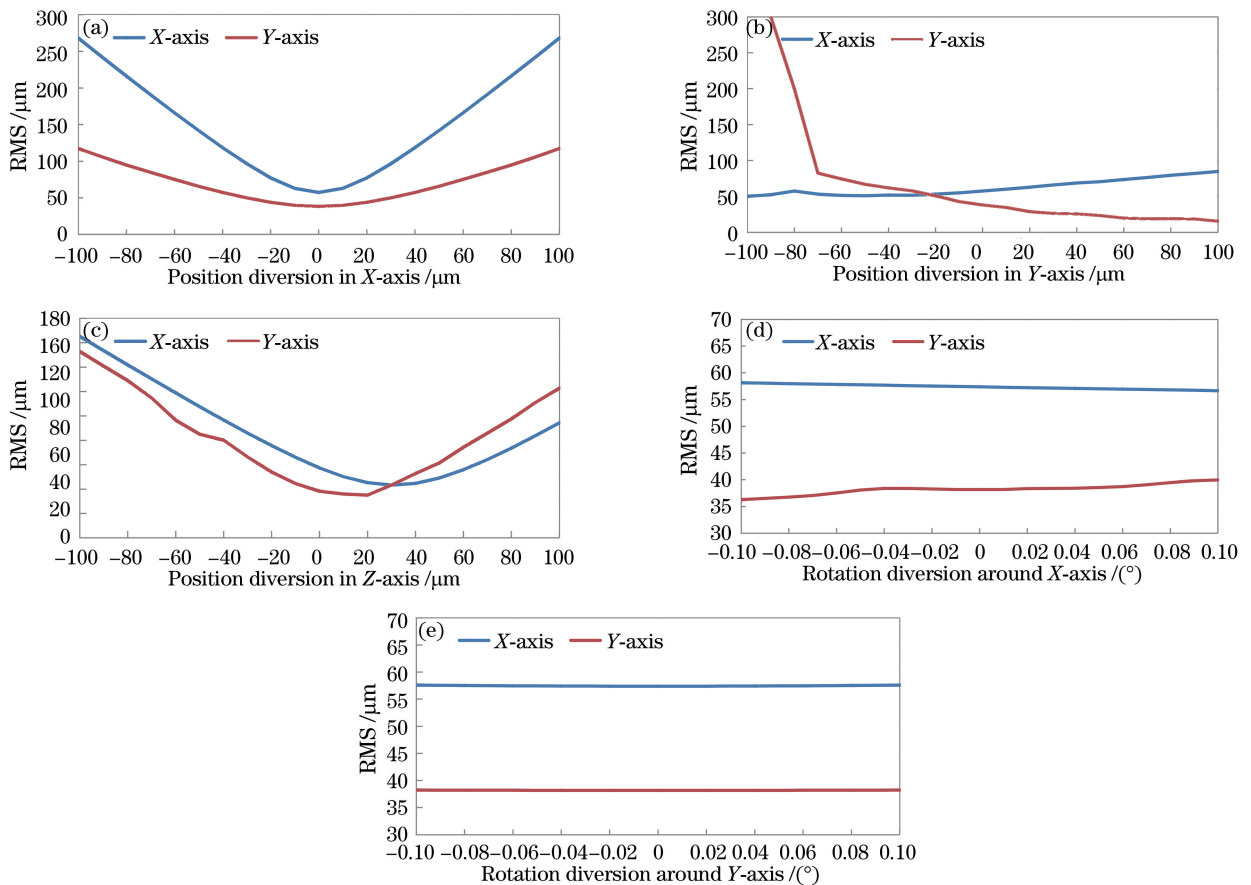


图 6 准直透镜的公差分析。沿(a) X 轴、(b) Y 轴和(c) Z 轴的位置误差;绕(d) X 轴和(e) Y 轴的旋转误差

Fig. 6 Tolerance analysis of the collimating lens. Position diversion in (a) X -axis, (b) Y -axis and (c) Z -axis; rotation diversion around (d) X -axis and (e) Y -axis

相同。光斑 X 轴方向的直径 RMS 值在 Z 轴位置误差为 $30 \mu\text{m}$ 时最小;光斑 Y 轴方向的直径 RMS 值在 Z 轴位置误差为 $10 \mu\text{m}$ 时最小。当沿 Z 轴的位置误差大于 $85 \mu\text{m}$ 或小于 $-25 \mu\text{m}$ 时,光斑 X 轴方向直径 RMS 值大于 $80 \mu\text{m}$ 。当沿 Z 轴的位置误差大于 $55 \mu\text{m}$ 或小于 $-30 \mu\text{m}$ 时,光斑 Y 轴方向直径 RMS 值大于 $70 \mu\text{m}$ 。由此可以看出,对准直透镜 Z 轴的位置误差需要进行较为精密的控制,需要将 Z 轴的位置误差控制在 $-30 \sim 55 \mu\text{m}$ 范围内。

图 6(d)和(e)为当准直透镜存在绕 X 轴或 Y 轴的旋转误差时,边缘视场光斑直径 RMS 值的变化规律。准直透镜存在 $\pm 0.1^\circ$ 的绕 X 轴或 Y 轴的旋转误差时,光轴直径 RMS 值在 X 轴和 Y 轴方向均满足公差要求。光斑直径 RMS 值对准直透镜绕 X 轴或 Y 轴的旋转误差不敏感。

因此需要对准直透镜进行定心控制,保证 X 轴和 Y 轴的位置误差;并且需要根据不同的激光器位置,精确调整沿 Z 轴的位置误差。

4.2 整形镜公差分析

整形镜为柱面镜元件,需要考虑的位置误差为沿 X 轴的偏移和沿 Z 轴的偏移;需要考虑的旋转误差为绕 X 轴的旋转、绕 Y 轴的旋转和绕 Z 轴的旋转。位置和旋转公差对边缘视场光斑直径 RMS 值的影响及仿真结果如图 7 所示。

图 7(a)和(b)为当整形镜存在沿 X 轴或 Z 轴的位置误差时,边缘视场光斑直径 RMS 值的变化规律。整形镜存在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 的沿 X 轴或 Z 轴的位置误差时,光轴直径 RMS 值在 X 轴和 Y 轴方向均满足公差要求。光斑直径 RMS 值对准直透镜沿 X 轴或 Z 轴的位置误差不敏感。

图 7(c)、(d)和(e)为当整形镜存在绕 X 轴、 Y 轴或 Z 轴的旋转误差时,边缘视场光斑直径 RMS 值的变化规律。整形镜存在 $\pm 0.1^\circ$ 的绕坐标轴的旋转误差时,光轴直径 RMS 值在 X 轴和 Y 轴方向均满足公差要

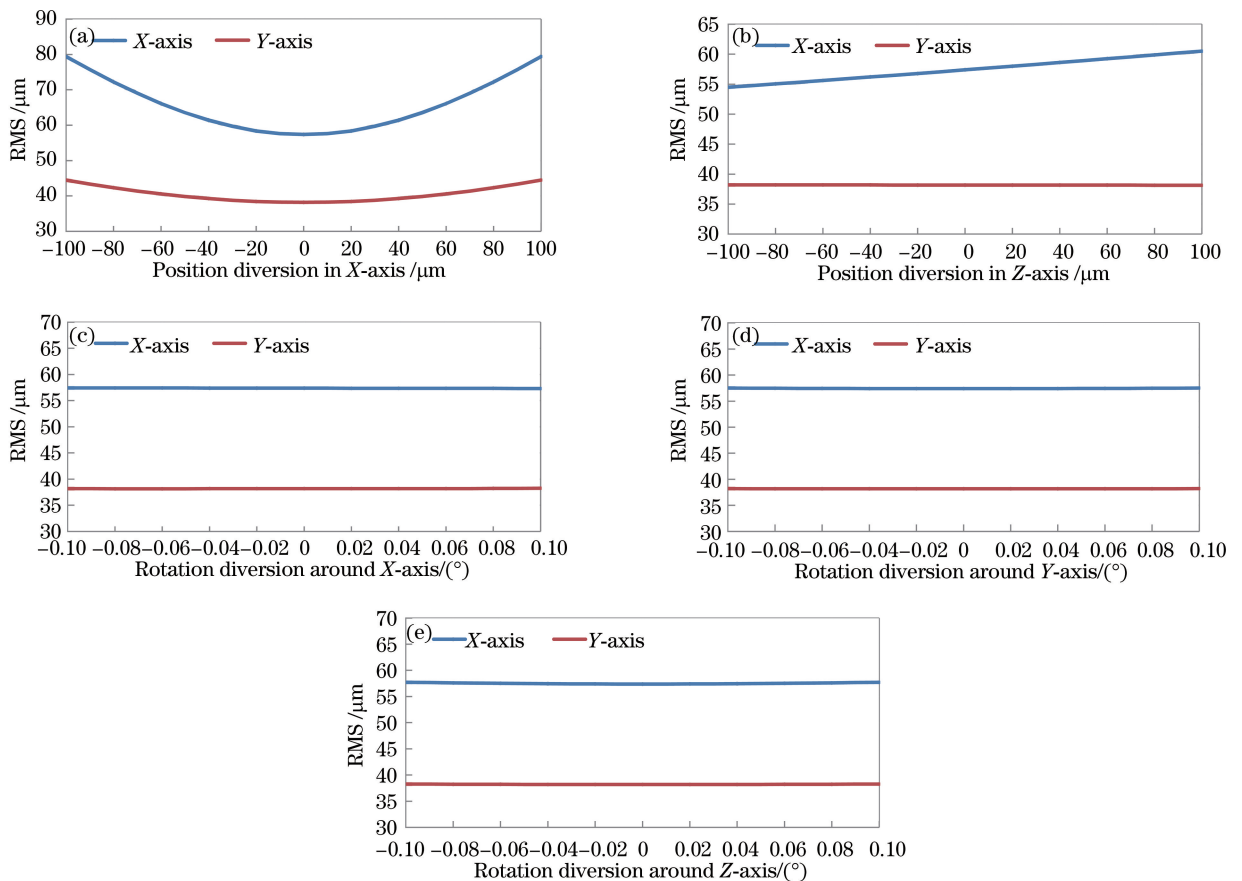


图 7 整形透镜公差分析。沿(a) X 轴和(b) Z 轴的位置误差;绕(c) X 轴、(d) Y 轴和(e) Z 轴的旋转误差

Fig. 7 Tolerance analysis of the reshaping lens. Position diversion in (a) X -axis and (b) Z -axis;

rotation diversion around (c) X -axis, (d) Y -axis and (e) Z -axis

求。光斑直径 RMS 值对绕坐标轴的旋转误差不敏感。

因此对整形镜的位置和旋转的公差要求并不高,目前的加工已经可以满足系统性能。

4.3 五棱镜公差分析

五棱镜为系统中的运动机构,该元件的中心位置为初始设计的定心位置,且其工作时高速旋转导致其位置偏差和旋转偏差均较小。因此本节主要考虑五棱镜的半径误差,如图 8 所示。当五棱镜的半径存在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 的半径误差时,光斑直径 RMS 值在 X 轴和 Y 轴方向均满足公差要求。光斑直径 RMS 值对五棱镜的半径误差不敏感。但是值得注意的一点为,当五棱镜的半径变小时,边缘视场的光斑直径 RMS 值变小。为此对五棱镜的半径存在 $-100 \mu\text{m}$ 的半径误差时进行仿真,整个视场的光斑直径 RMS 值如图 9 所示,满足设计要求。存在 $-100 \mu\text{m}$ 半径误差的整个视场的光斑直径 RMS 值与不存在半径误差的整个视场的光斑直径 RMS 值(图 5)相比,不存在半径误差的整个视场光斑直径一致性较好。因此,五棱镜的半径公差要求并不高,目前的加工已经可以满足系统性能。

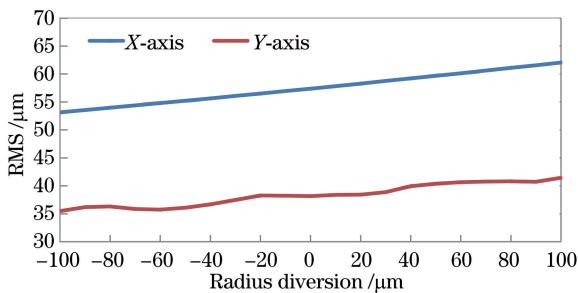


图 8 五棱镜半径误差公差分析

Fig. 8 Tolerance analysis of radius error of pentaprism

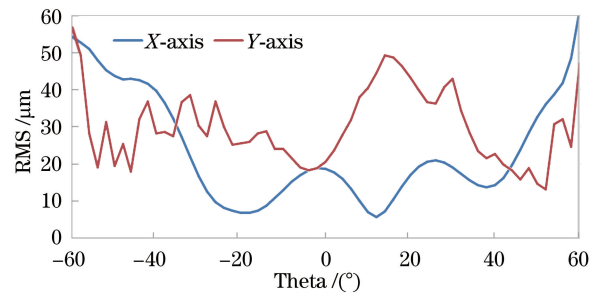


图 9 五棱镜半径误差为 $-100 \mu\text{m}$ 时,整个视场的光斑直径 RMS 值

Fig. 9 Beam diameter RMS value in the whole field with the pentaprism radius error of $-100 \mu\text{m}$

4.4 F-Theta 透镜公差分析

F-Theta 透镜是光学自由曲面元件,作为一个整体,需要考虑的位置误差为沿 X 轴的偏移、沿 Y 轴的偏移和沿 Z 轴的偏移;需要考虑的旋转误差为绕 X 轴的旋转、绕 Y 轴的旋转和绕 Z 轴的旋转。位置和旋转公差对边缘视场光斑直径 RMS 值的影响及仿真结果如图 10 所示。

图 10(a)、(b)和(c)为当 F-Theta 透镜存在沿 X 轴、Y 轴和 Z 轴的位置误差时,边缘视场光斑直径 RMS 值的变化规律。F-Theta 透镜存在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 的位置误差时,光轴直径 RMS 值在 X 轴和 Y 轴方向均满足公差要求。光斑直径 RMS 值对 F-Theta 透镜的位置误差不敏感。

图 10(d)、(e)和(f)为当 F-Theta 透镜存在绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴的旋转误差时,边缘视场光斑直径 RMS 值的变化规律。F-Theta 透镜存在 $\pm 0.1^\circ$ 的旋转误差时,光轴直径 RMS 值在 X 轴和 Y 轴方向均满足公差要求。光斑直径 RMS 值对 F-Theta 透镜的旋转误差不敏感。

由以上分析可知,光学系统对 F-Theta 透镜的位置和旋转的公差要求并不高,目前的加工和装配精度已可满足系统性能要求。

5 测量结果和分析

对该光学自由曲面系统进行测量,采用 BeamOn HR(Duma Optronics Ltd.)光斑分析仪作为像面探测器,测量系统光斑的性能。

系统光斑测量示意图如图 1 所示,激光光源经过准直透镜、光阑、整形镜、五棱镜和 F-Theta 透镜后,在像面处放置探测器。其中光学扫描系统中各个零件的放置位置满足设计值。

实际测量的光斑结果如图 11 所示,光斑 X 方向和 Y 方向的直径分别为 $70.51 \mu\text{m}$ 和 $66.55 \mu\text{m}$ 。其中图 11(a)为采用较高衰减值的衰减片降低干扰,观察光斑直径;图 11(b)为采用较低衰减值的衰减片观察衍射效应。通过统一场光学仿真得到的光斑结果如图 12 所示,光斑 X 方向和 Y 方向的直径分别为 $52.032 \mu\text{m}$

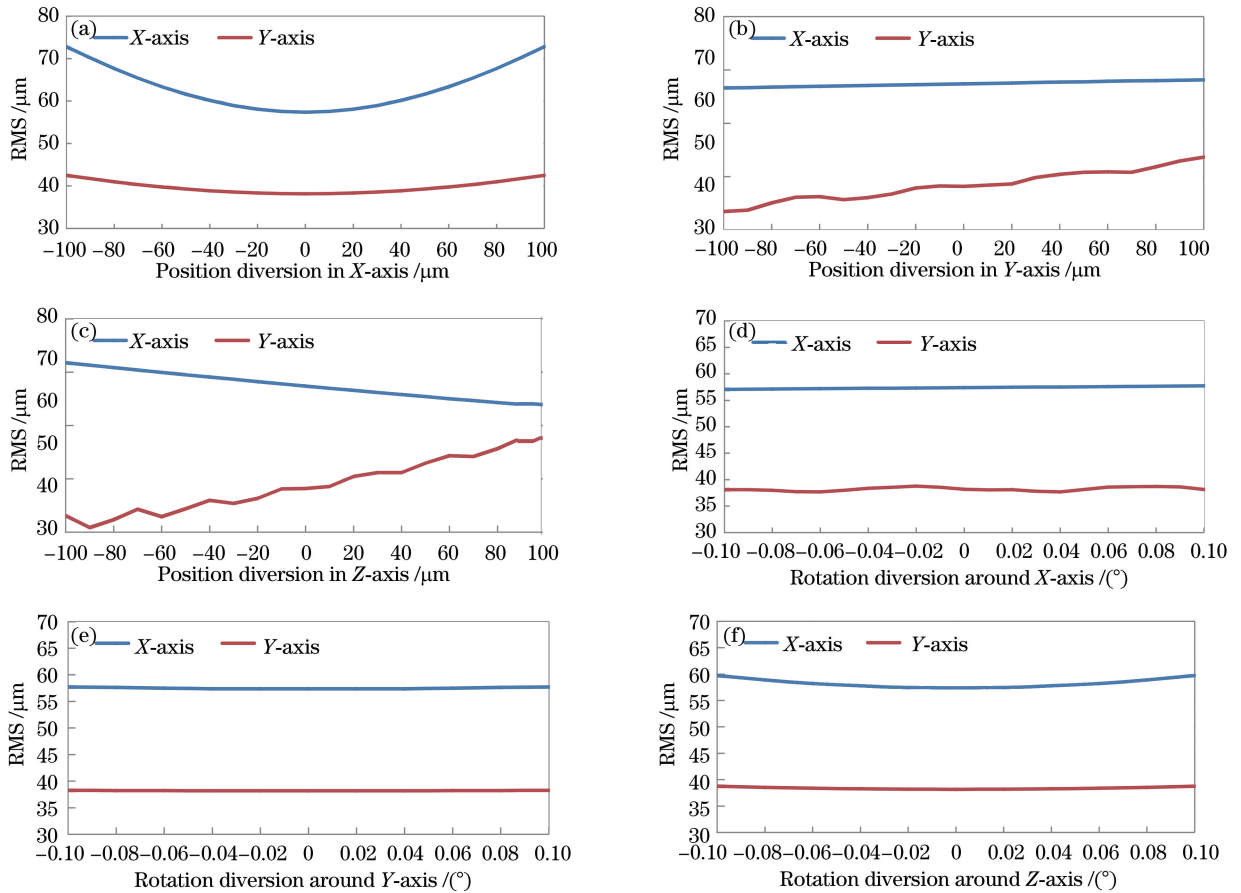


图 10 F-Theta 透镜公差分析。沿(a) X 轴、(b) Y 轴和(c) Z 轴的位置误差;绕(d) X 轴、(e) Y 轴、(f) Z 轴的旋转误差

Fig. 10 Tolerance analysis of the F-Theta lens. Position diversion in (a) X-axis, (b) Y-axis and (c) Z-axis; rotation diversion around (d) X-axis, (e) Y-axis and (f) Z-axis

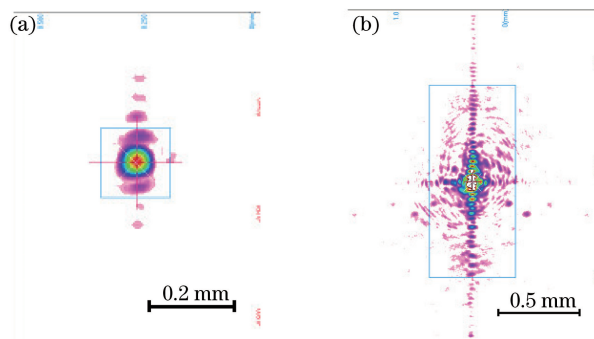


图 11 系统像面光斑测量结果。(a)高衰减;(b)低衰减

Fig. 11 Measurement results of the spot in system image plane. (a) High attenuation; (b) low attenuation

和 $47.292 \mu\text{m}$ 。实际测量和仿真结果在光斑的能量分布上相近,两者均存在着一定的光斑衍射。测量结果比仿真结果要稍大一些,这主要是因为测量系统的放置存在一定的公差,由此产生测量数值的差异。但是由于整个样机满足设计公差,因此其使用性能满足实际需求。

6 结 论

基于统一场追迹的光学自由曲面系统仿真可以很好地与测量结果进行对比。对于系统的公差分析可知,需要对准直透镜进行定心控制,将 X 轴的位置误差控制在绝对值 $30 \mu\text{m}$ 以下,Y 轴的位置误差控制在绝对值 $70 \mu\text{m}$ 以下,将 Z 轴的位置误差控制在 $-30 \sim 55 \mu\text{m}$ 范围内。系统对整形镜和 F-Theta 透镜的位置和

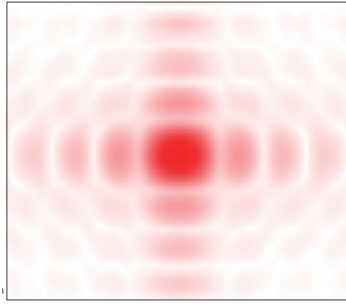


图 12 系统像面光斑仿真结果

Fig. 12 Simulation result of the spot in system image plane

旋转的公差要求并不高,位置公差控制在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内,旋转公差控制在 $\pm 0.1^\circ$ 以内即可。系统对五棱镜的半径公差要求也不高,半径误差控制在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 即可。通过系统的公差分析,可以指导超精密制造的加工过程,从而降低光学自由曲面制造过程中的制造成本和加工难度。

参 考 文 献

- [1] Okada T. Laser via-hole drilling of printed wiring board[C]. SPIE, 2000, 4088: 148-153.
- [2] Marshall G F. High-quality image recorder and evaluation[J]. SPIE, 1991, 1454: 370-381.
- [3] Yurevich V I, Grimm V A, Afonyushkin A A, *et al.* Optical design and performance of F-Theta lenses for high-power and high-precision applications[C]. SPIE, 2015, 9626: 962660.
- [4] Fu Minmin, Chen Peifeng, Wang Ying, *et al.* Optical design of super wide angle F-Theta lens with large operation area [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6): 1083-1087.
付敏敏, 陈培锋, 王英, 等. 超广角大工作面 F-Theta 镜头的光学设计[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1083-1087.
- [5] Beiser L. Unified optical scanning technology[M]. John Wiley & Sons, 2005.
- [6] Fang F, Cheng Y, Zhang X. Design of freeform optics[J]. Advanced Optical Technologies, 2013, 2(5): 445-453.
- [7] Xie Hongbo, Li Yong, Yao Lijuan, *et al.* Design of free-form $f-\theta$ lens in polygonal mirror laser scanning system[J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 742-746.
谢洪波, 李勇, 姚丽娟, 等. 激光转镜扫描系统中自由曲面 $f-\theta$ 物镜的设计[J]. 激光技术, 2014, 38(6): 742-746.
- [8] Deng Pinghu, Lin Feng. Method of tolerance sensitivity reduction of optical design [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112202.
邓桦湖, 林峰. 光学设计中降低公差灵敏度的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112202.
- [9] Sun Yuanyuan, Li Yanqiu, Cao Zhen. Tolerance analysis of high-numerical aperture extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122207.
孙圆圆, 李艳秋, 曹振. 超大数值孔径极紫外光刻物镜的公差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122207.
- [10] Ji Yiqun, Shen Weimin. Optical design of large working area F-Theta lens[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(11): 1539-1542.
季轶群, 沈为民. 大工作面 F-Theta 镜头的光学设计[J]. 光学学报, 2005, 25(11): 1539-1542.
- [11] Fang F Z, Zhang X D, Weckenmann A, *et al.* Manufacturing and measurement of freeform optics[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(2): 823-846.
- [12] Wyrowski F K M. Introduction to field tracing[J]. Journal of Modern Optics, 2011, 58(5/6): 449-467.