

文章编号 1004-924X(2011)09-2100-08

Fizeau 干涉仪主机的热稳定性设计与分析

王 平*, 王汝冬, 田 伟, 王立朋, 隋永新, 杨怀江
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 搭建了光-机-热耦合模型, 用于分析 Fizeau 干涉仪光机系统的热稳定性, 并研究了该系统的计算流程、环境温度和系统光学质量的随机性、系统光学质量与环境温度的关系等。首先, 根据实验室温控条件, 建立环境温度的随机分布模型, 进行了光-机-热耦合分析并计算不同温度下光机结构的热分布和结构变形; 然后, 通过 Zernike 多项式拟合透镜表面面形和曲率半径, 利用光学仿真软件分析变形后的光学系统; 最后, 对系统光学质量进行概率分析, 评价了系统的热稳定性。分析结果表明, 温度控制在 $(22 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 时, 在 2σ 的置信水平下, Fizeau 干涉仪的出射光波前的重复性可以达到 $0.016\% \lambda$, 基本满足干涉仪主机光机系统的重复性要求。

关 键 词: Fizeau 干涉仪; 光机稳定性; 重复性; 光-机-热耦合分析

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2100

Design and analysis of thermal stability for main frame in Fizeau interferometer

WANG Ping*, WANG Ru-dong, TIAN Wei, WANG Li-peng, SUI Yong-xin, YANG Huai-jiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: alex.wongp@gmail.com

Abstract: An optical-structural-thermal model was built to analyze the thermal stability of an optical-structural system in the Fizeau interferometer. The analyzing process of the model, random distribution of environment temperatures, and the optical performance of the system were researched. Firstly, a random model for environment temperatures was built based on the thermal control system, and the thermal distribution and deformation of the optical-structural system were computed. Then, the surface forms and curvature radii of the optical component were fitted with the Zernike polynomial, and the fitted optical system was analyzed with the optical software. Finally, a random model to indicate the relationship of optical performance and temperature was built and the thermal stability of the main frame in the interferometer was discussed through analyzing the random model. Results indicate that the repeatability of the optical-structural system is $0.016\% \lambda$ under believable level of 2σ when the temperature is $(22 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, which satisfies the requirements of the Fizeau interferometer for stability.

收稿日期: 2011-01-07; 修订日期: 2011-01-29.

基金项目: 02 重大专项 (No. 2009ZX02205)

Key words: Fizeau interferometer; optical-structural stability; repeatability; optical-structural-thermal coupled analysis

1 引言

Fizeau干涉仪是目前光学元件面形检测的主要工具,利用参考面和待测面产生的两束相干光的干涉进行测量,其检测精度可以达到纳米量级。极紫外光刻机镜头中光学元件的面形RMS为1~2 nm,对干涉仪的检测精度要求极高,而对干涉仪自身的重复性则要求优于元件的面形精度。干涉测量的精度主要取决于干涉腔的精度,但是随测量精度的提高,环境的影响越来越显著,极易造成测量重复性降低。因此,在设计Fizeau干涉仪主机结构时,必须要保证干涉仪主机的稳定性。Zygo公司的GPI系列干涉仪主机的重复性可以达到 $1/10\,000\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),是目前商用产品的较高水平。

造成Fizeau干涉仪主机结构不稳定的因素主要包括:环境温度、振动^[1]、时效,其中温度是影响最大的因素。环境温度在一定范围内随机变动会造成主机内部的热平衡随机变化,在分析这种热影响时,需要建立一个光-机-热耦合模型,通过光学指标来反映环境温度对结构的影响,进而指示出在变动的环境温度下,主机光机系统的重复性如何。徐兰^[2]等分析了测量系统误差,并对其重复性进行了探讨;赵鹏^[3]、王贤民^[4]、武旭华^[5]等研究了Fizeau移相干涉仪的光学设计和结构设计,并对其稳定性和干涉仪指标评价进行了研究;卢鐸^[6]、温敬阳^[7]等对光机系统的光-机-热耦合分析进行了研究;傅学农^[8]、张军伟^[9]、黄宏彪^[10]等对光机结构的热稳定性进行了分析。但是,上述文献仅是分别对系统进行了误差分析和光-机-热耦合分析,并没有将环境温度和结构与误差进行量化的关联。本文对环境温度进行了概率建模,然后通过光-机-热耦合分析,得出温度与干涉仪光机结构之间的函数关系,进而计算光机系统光学性能的概率分布,并对重复性进行量化评估。

2 干涉仪光机系统重复性分析

本文利用UG, MSC Patran, MSC Nastran, Code V, FittingA. m建立了如图1所示的光-机-热耦合分析流程。首先,利用UG建模软件设计了干涉仪的机械结构,将UG设计的prt文件转化成iges文件;然后,在MSC Patran、MSC Nastran中导入iges文件,进行热分析和结构分析,获得光学元件之间相互位置和元件静态变形和应力的数据;接着,提取有限元分析的结果,通过设计的Matlab程序对变形结果进行Zernike多项式拟合,得到光学元件表面的面形和新的曲率半径;最后,将这些数据输入到Code V中进行光学仿真,计算该温度下的光学系统出射光的波前rms,将出射波前的rms作为评价系统重复性的指标。

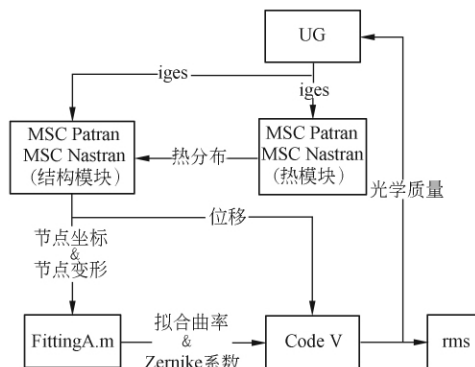


图1 光-机-热耦合分析流程图

Fig. 1 Flow chart of analyzing optical-structural-thermal coupled model

FittingA. m 是一个 Matlab 程序,利用 Zernike 系数拟合有限元程序计算的节点坐标和变形量,获得镜面变形后的最佳曲率半径以及 36 项 Zernike 系数。单位圆域上的正交 Zernike 多项式可以表示为:

$$Z_j(\rho, \theta) = \begin{cases} \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) & , m=0 \\ \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \cos(m\theta), m=1, 3, 5, \dots, j \\ \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \sin(m\theta), m=2, 4, 6, \dots, j \end{cases} \quad (1)$$

其中, $0 \leq \rho \leq 1$, (ρ, θ) 为极坐标系下单位圆上的任意一点, R_m^n 由式(2)给出:

$$R_m^n(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} \quad (2)$$

其中: n 为非负整数, 且 $n-m$ 为偶数; n 表示极径的阶次, m 表示角幅值, j 表示 Zernike 多项式的阶次, 其每一个阶次的向量都表示一种类型的表面。在光学仿真软件中, 输入对应的 Zernike 系数, 可以拟合任意表面。

环境温度是一个随机变量, 为了定量描述温度的随机变动对干涉仪光机系统重复性的影响, 需要为温度定义概率分布形式。测量数据的随机误差可以看作是均匀分布或者正态分布, 采用均匀分布计算的方差较保守, 采用正态分布计算的方差则较激进。本文分别研究此两种分布形式下的温度影响。一般实验室的温度可以控制在 $(22 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, 那么, 可以获得该条件下正态分布和均匀分布的概率密度函数如式(3), 式(4)。

正态分布:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.034} \exp\left(-\frac{(t-22)^2}{2 \times 0.034^2}\right), (-\infty < t < \infty) \quad (3)$$

均匀分布:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{22.1 - 21.9} & 21.9 \leq t \leq 22.1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

均匀分布的方差 σ^2 为 0.057 72, 置信系数 K 为 1.732; 正态分布的方差 σ^2 为 0.034^2 , 置信系

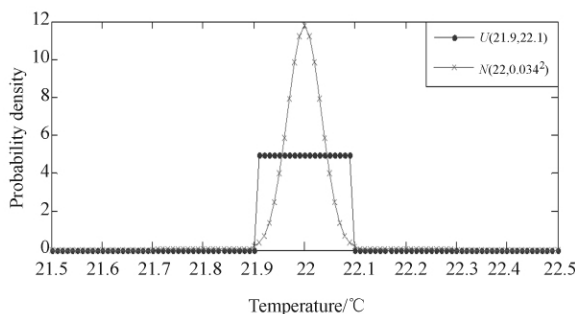


图 2 温度概率密度曲线

Fig. 2 Curve of temperature probability density

数 K 为 2.96, 温度在 $(22 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 时的概率为 99%。此两种温度分布的概率密度分布函数如图 2 所示。

3 位置变化

干涉仪中光学元件位置的变化会导致系统光学质量的变化, 降低测试的重复性。这种位置的变化由下列因素引起: 加工、装配、温度变化。机械元件加工、装配时会留有一定的尺寸和形状误差, 造成光学元件不能完全按照设计值进行定位, 这种情况产生系统误差 $E_{S, dm}$; 在机械元件加工、装配时会在元件中残留应力, 这种应力会随着时间而逐渐释放, 造成光学元件位置的变化, 这种情况产生随机误差 $E_{R, dm}$ 。

温度对干涉仪光学元件位置的影响可以从两方面考虑: 内部热源和环境温度。内部热源为干涉仪自身的发热元件, 包括 CCD、CMOS、电机、电路、激光器、运动部件, 它们通过空气对流和热传导的方式散热。开机一段时间以后, 干涉仪内部会达到一个热平衡的状态, 通过仿真分析, 干涉仪内部在工作状态下的最高温度为 31.35°C 。因为热平衡状态下温度高于干涉仪元器件加工和装配时的温度, 所以会造成整个光机结构产生变形。在外界环境不变的条件下, 干涉仪自身的热平衡状态是稳定的, 其产生的应力和变形也是稳定的, 因此, 内部热源产生系统误差 $E_{S, dh}$ 。干涉仪内部热源热平衡的边界条件是环境温度, 如果环境温度发生了变化, 那么干涉仪内部的热平衡也会相应地漂移, 导致光学元件的位置随之变化。由于环境温度是一个随机变量, 因此, 这种环境温度变化产生了随机误差 $E_{R, de}$ 。为了分析环境温度对干涉仪光机系统稳定性的影响, 需要分析各个温度条件下系统的光学质量, 然后通过回归分析的方法, 建立他们之间的函数关系。

本文分别计算了环境温度下系统的光学质量, 如表 1 所示。对表 1 中的数据进行回归分析, 如图 3 所示。

建立环境温度 t 与干涉仪系统光学质量 P 之间的关系式:

$$P = 0.000\ 34t + 0.016 \quad (5)$$

综合上面的分析, 建立光学元件位置变化导致的误差公式如下式:

$$E_d = \sqrt{E_{S, dm}^2 + E_{R, dm}^2 + E_{S, dh}^2 + E_{R, de}^2}, \quad (6)$$

其中: E_d 为元件位置变化引起的误差; $E_{S, dm}$ 为加工、装调产生元件位置变化引起的系统误差; $E_{R, dm}$ 为加工、装调产生元件位置变化引起的随机误差; $E_{S, dh}$ 为内部热源产生元件位置变化引起的系统误差; $E_{R, de}$ 为环境温度变化产生元件位置变化引起的随机误差。

表1 温度变化时,光学件相互位置变化导致的系统光学质量的变化

Tab. 1 Optical performance caused by displacements changed with environmental temperatures

环境温度 /℃	出射光波前 rms(λ)	环境温度 /℃	出射光波前 rms(λ)
21.00	0.0231	22.00	0.0235
21.38	0.0233	22.02	0.0235
21.70	0.0234	22.06	0.0235
21.86	0.0234	22.14	0.0235
21.94	0.0235	22.30	0.0236
21.98	0.0235	22.62	0.0237
22.00	0.0235	23.00	0.0238

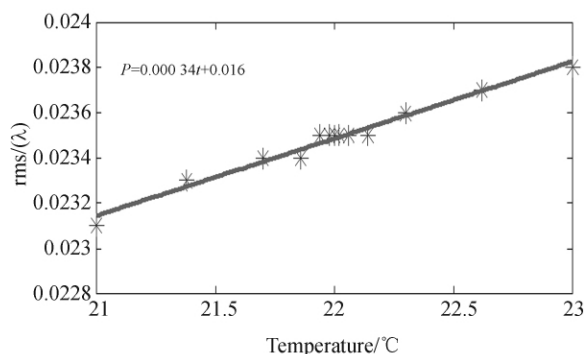


图3 温度变化时,光学件相互位置变化导致的系统光学质量的变化曲线

Fig. 3 Optical performance caused by displacements changed with environmental temperatures

4 静态变形和应力

干涉仪中光学元件静态变形和应力的变化会导致系统光学质量的变化,降低测试的重复性;这种变形和应力的变化由下列因素引起:加工、装配、温度变化。加工过程会在元件内部残留应力,造成光学元件内部形成应力双折射,而随着时间变化,这种残留应力逐步释放,改变元件内部的应

力双折射状态,这种情况产生随机误差 $E_{R, sm}$;装配时,会在固定元件时施加一定的夹持力,造成光学元件产生静态变形和应力,这种情况产生系统误差 $E_{S, sm}$ 。

温度对干涉仪光学元件静态变形和应力的影响可以从两方面考虑:内部热源和环境温度。当干涉仪内部达到热平衡状态时,由于温度发生变化,各个光机结构会产生一定的热应力和变形,改变光学元件的面形和应力,这种情况产生系统误差 $E_{S, sh}$ 。由于本文以干涉仪出射光质量为评价指标,因此,在考虑温度对光学元件静态变形和应力的影响时,取准直镜组作为研究对象,如图4所示。在环境温度为22℃时的热平衡状态下,准直镜组的热变形云图如图5所示。

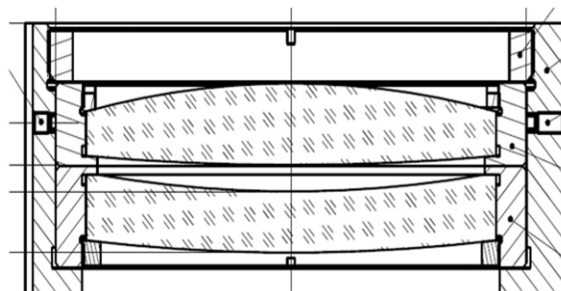


图4 准直镜组的光机结构示意图

Fig. 4 Optical structure collimator

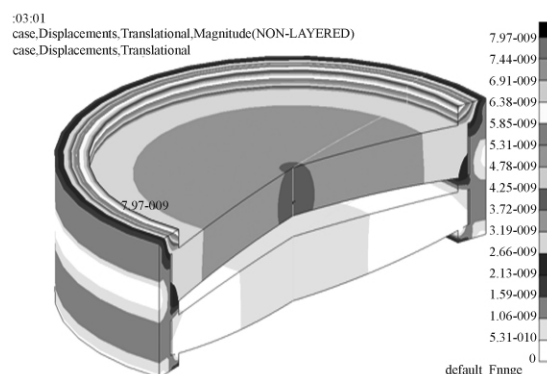
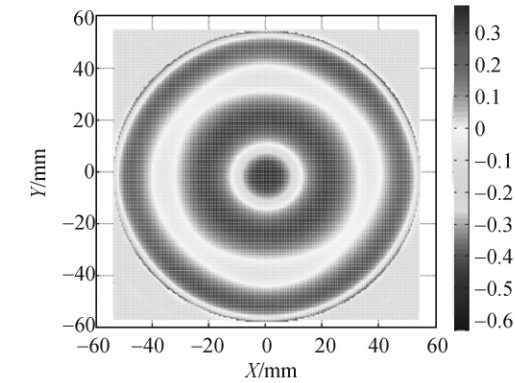
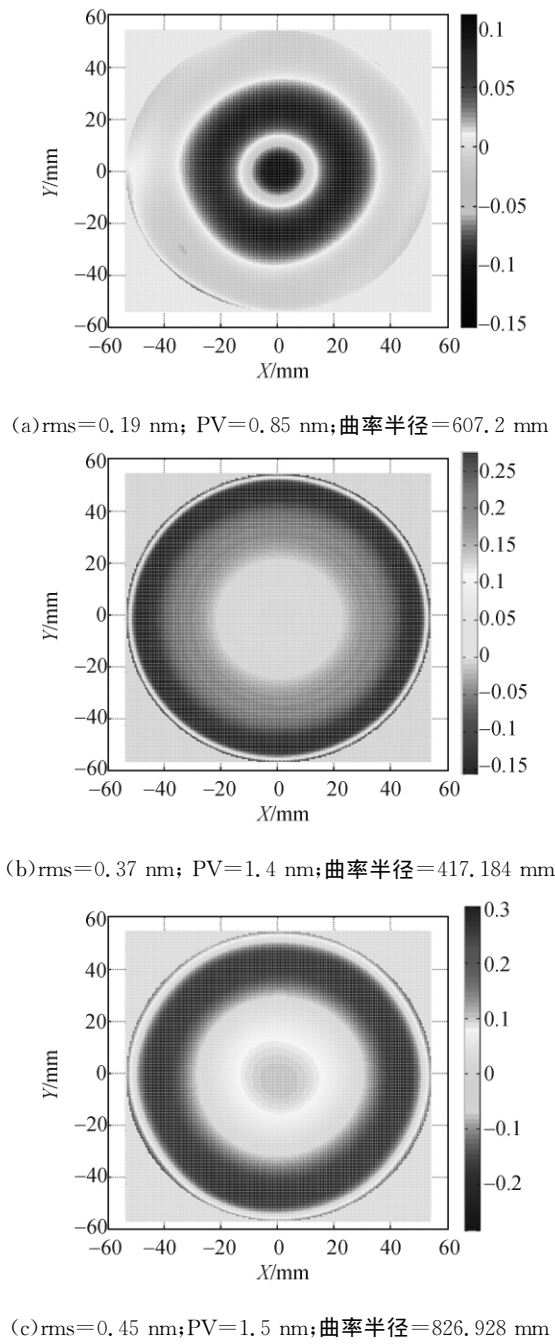


图5 22℃下,准直镜组的变形云图($D_{max} = 8 \text{ nm}$)

Fig. 5 Deformation distribution of collimator at 22℃

将仿真结果中4个镜面的节点坐标和变形数据提取出来,利用 FittingA.m 程序进行 Zernike 多项式拟合,获得如图6所示的面形云图,然后将计算得到的曲率半径和 Zernike 系数导入到 Code V 仿真软件中,计算光学系统的出射光质量,即可以评价温度变化导致的静态应力和变形对光学系统的影响。

环境温度的变化导致干涉仪内部热平衡的移动,进而改变光学元件的静态应力和变形,这种情况产生随机误差 $E_{R,se}$ 。为了分析环境温度变化与该误差之间的关系,需要分析不同温度下,光学元件变形对出射光质量的影响。分别计算环境温度下的光学质量,如表 2 所示。对表 2 中的数据进行分析,获得如图 7 所示的曲线。因此,建立了温度 t 与主机系统光学性能 P 之间的关系式:



(d)rms=0.74 nm;PV=2.5 nm;曲率半径=267.53 mm

图 6 22 °C 下,准直镜组 4 个镜面的面形云图
Fig. 6 Forms of 4 surfaces for collimator at 22 °C

表 2 温度变化时,光学件变形所导致的光学质量变化
Tab. 2 Optical performance caused by deformation changed with environmental temperatures

环境温度 /°C	出射光波前 rms(λ)	环境温度 /°C	出射光波前 rms(λ)
21.00	0.021 3	22.00	0.023 5
21.38	0.022 1	22.02	0.023 6
21.70	0.022 8	22.06	0.023 8
21.86	0.023 2	22.14	0.024 2
21.94	0.023 3	22.30	0.025 0
21.98	0.023 4	22.62	0.025 9
22.00	0.023 5	23.00	0.023 5

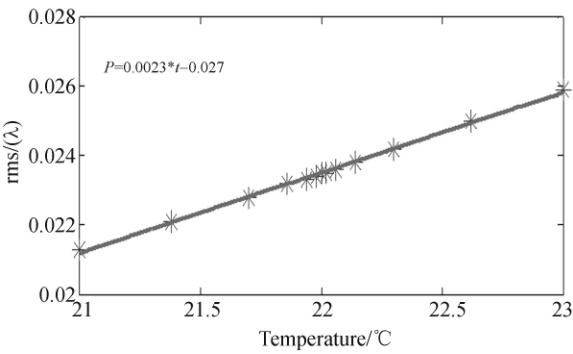


图 7 温度变化时,光学件变形所导致的光学系统质量变化曲线

Fig. 7 Optical performance caused by deformation changed with environmental temperatures

$$P=0.0023t-0.027, \quad (7)$$

建立静态变形和应力导致的误差公式如下所示:

$$E_s = \sqrt{E_{S,sm}^2 + E_{R,sm}^2 + E_{S,sh}^2 + E_{R,se}^2}, \quad (8)$$

其中: E_s 为静态变形和应力引起的误差; $E_{S,sm}$ 为加工、装调应力产生静态变形和应力引起的系统误差; $E_{R,sm}$ 为加工、装调产生静态变形和应力引起的随机误差; $E_{S,sh}$ 为内部热源产生静态变形和

应力引起的系统误差; $E_{R,se}$ 为环境温度变化产生静态变形和应力引起的随机误差。

5 误差合成

将影响干涉仪光机结构重复性的误差公式(6)、(8)合并,得到总误差 E 的公式,如式(9)所示:

$$E = \sqrt{E_s^2 + E_d^2} = \sqrt{E_{S,dm}^2 + E_{R,dm}^2 + E_{S,dh}^2 + E_{R,de}^2 + E_{S,sm}^2 + E_{R,sm}^2 + E_{S,sh}^2 + E_{R,se}^2}, \quad (9)$$

整理后,得到公式(10)。

$$E = \sqrt{E_S^2 + E_R^2} = \sqrt{(E_{S,dm}^2 + E_{R,dm}^2 + E_{S,sh}^2 + E_{R,de}^2) + (E_{S,sm}^2 + E_{R,sm}^2 + E_{S,sh}^2 + E_{R,se}^2)}, \quad (10)$$

其中: E_S 为系统误差,可以通过干涉仪整体标定予以消除; E_R 为随机误差,是影响系统重复性的因素。

随机误差 ER 可以写成:

$$E_R = \sqrt{E_{R,m}^2 + E_{R,e}^2} = \sqrt{(E_{R,dm}^2 + E_{R,sm}^2) + (E_{R,de}^2 + E_{R,se}^2)}, \quad (11)$$

其中: $E_{R,m}$ 为干涉仪加工、装调时残余应力造成的随机误差,可以通过时效的办法极大地消除; $E_{R,e}$ 为环境温度变化造成的随机误差,是一个与温度分布有关的随机误差。

上述分析显示,对干涉仪光机结构的重复性影响最大的因素是环境温度变化所造成的随机误差,在知道环境温度分布和环境温度与系统光学质量评价指标的关系的情况下,可以计算出光学质量重复性的概率特性。

根据概率理论,如果变量 x 具有概率密度函数 $y=f(x)$, $-\infty < x < +\infty$,则 x 的函数 $y=g(x)$, $g(x) \in [\alpha, \beta]$ 的概率密度函数可以按式(12)计算得到:

$$f_Y(y) = \begin{cases} f_X(h(y)) |h'(y)| & \alpha \leq y \leq \beta \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}, \quad (12)$$

其中, $x=h(y)$ 。因此,可以将式(5)和式(7)有关温度的概率密度转化成系统光学指标的概率密度函数。如下列公式所示:

均匀分布:

位置变化:

$$f_{p1}(P) = \begin{cases} \frac{1}{0.0001}, 0.0234 \leq P \leq 0.0235 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}, \quad (13)$$

静态变形和应力:

$$f_{p2}(P) = \begin{cases} \frac{1}{0.0001}, 0.0234 \leq P \leq 0.0238 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}, \quad (14)$$

正态分布:

位置变化:

$$f_{p3}(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.00001} \exp\left(-\frac{(P-0.0235)^2}{2 \times 0.00001^2}\right), \quad (-\infty < P < \infty), \quad (15)$$

静态变形和应力:

$$f_{p4}(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.00008} \exp\left(-\frac{(P-0.0235)^2}{2 \times 0.00008^2}\right), \quad (-\infty < P < \infty), \quad (16)$$

表3 正态分布和均匀分布的合成

Tab.3 Compounding normal distribution and uniformity distribution

分布形式	方差		
	元件位置变化	元件静态变形和应力	合成
正态分布	0.00001 ²	0.00008 ²	0.00008 ²
均匀分布	0.00003 ²	0.00011 ²	0.00011 ²

分别计算公式(13)~(16)的方差,然后进行误差合成,得到的数据如表3所示。从表中可以看出,针对本干涉仪的光机系统,正态分布和均匀分布的计算结果较为接近,如果按照正态分布来计算,可以得到系统出射波前质量服从 $N(0.0235, 0.00008^2)$,如果考虑在 2σ 的置信水平下,系统可以保证出射光波前质量的重复性能够

达到 $0.016\%\lambda$ 。上述指标符合 Fizeau 干涉仪的设计标准。

6 结 论

本文建立了一个光-机-热耦合模型,分析了不同温度下 Fizeau 干涉仪主机出射光的质量,并建立了函数关系式。对温度的随机特性进行了建模,分别用正态分布和均匀分布来模拟温度的随机性,然后通过仿真分析获得的函数关系将干涉

仪光机系统的随机性用概率密度的方式表达出来,并对比了两种分布形式下干涉仪出射光质量的方差。得到的结果显示,温度在 $22\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,系统光学出射波前质量服从 $N(0.0235, 0.000\ 08^2)$,在置信水平为 2σ 时,可以保证 $0.016\%\lambda$ 的重复性。

由于在分析时对实际问题进行了一定的简化处理,因此,分析结果需要后续进行实验验证,在实验的基础上改进仿真模型,以实现仿真分析能够指导设计和优化设计。

参考文献:

- [1] VICTOR L G, KEITH B D, GREGORY J M. Optical performance as a function dynamic mechanical loading [J]. *SPIE*, 2008, 5178(4):1-6.
- [2] 徐兰. 测量系统误差分析研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
XU L. *Study of measurement system's uncertainty analysis* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2007. (in Chinese)
- [3] 赵鹏,卢钊,王家骥. 空间光学仪器光、机、热一体化总体设计光学[J]. *光学 精密工程*,1996, 4 (6):17-21.
ZHAO P, LU E, WANG J Q. Integrated design for space optical instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4 (6):17-21. (in Chinese)
- [4] 王贤民. 光学微小波相差标准装置设计与研究 [D]. 南京:南京理工大学,2004.
WANG X M. *Design and study on the interferometer* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology. 2004. (in Chinese)
- [5] 武旭华. 300 mm 移相干涉仪的关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
WU X H. *Study on the key technology of 300 mm aperture phase shift interferometer* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology. 2007. (in Chinese)
- [6] 卢钊,朱晓明,孙同和,等. 基于 CAD/CAE/CAT 技术的空间遥感相机热设计研究光学[J]. *光学 精密工程*, 1998,6(5):21-32.
- [7] LU E, NIU X M, SUN T H, *et al.*. Study on thermal control design of space camera based on CAD/CAE/CAT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5):21-32. (in Chinese)
- [7] 温敬阳. 光机热集成分析方法与技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2008.
WEN J Y. *Research on methods and techniques of optomechanical integrated analysis* [D]. Xidian University. 2008. (in Chinese)
- [8] 傅学农,陈晓娟,吴文凯,等. 大口径反射镜组件设计及稳定性研究[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(2): 179-183.
FU X N, CHEN X J, WU W K, *et al.*. Design of large aperture mirror support and its stability [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):179-183. (in Chinese)
- [9] 张军伟,周忆,周海,等. 瞬态温度变化对大口径光学元件的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(2):333-337.
ZHANG J W, ZHOU Y, ZHOU H, *et al.*. Effect of transient change of temperature on large-aperture optical element [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(2):333-337. (in Chinese)
- [10] 黄宏彪,曾台英,张涛,等. 神光 II 升级装置中靶场桁架的结构稳定性[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(1):67-70.

HUANG H B, ZENG Y T, ZHANG T, *et al.*.
Structure stability of superstructure in SG-II up-

grade facility [J]. *High power laser and particle
beams*, 2009, 21(1):67-70. (in Chinese)

作者简介:



王 平(1984—),男,辽宁鞍山人,研究
实习员,2006 年于大连理工大学获得
学士学位,2009 年于上海交通大学获
得硕士学位,主要从事光学仪器结构的
研究。E-mail: alex. wongp @ gmail.
com



王汝冬(1982—),男,江苏徐州人,研究
实习员,2006 年于北京航空航天大学
获得学士学位,2009 年于上海航天设
计研究所获得硕士学位,主要从事光学
仪器结构的研究。E-mail: rudong1415
@163. com



田 伟(1983—),男,河北秦皇岛人,研
究实习员,2006 年于中国地质大学获
得学士学位,2009 年于北京科技大学
获得硕士学位,主要从事光学仪器结构
的研究。E-mail: tw_919@163. com



王立朋(1954—),男,吉林长春人,高级
工程师,主要从事光学仪器的设计和研
制。



隋永新(1970—),男,吉林长春人,博
士,研究员,1993 年、1996 年于长春理
工大学分别获得学士、硕士学位,2002
年于中科院长春光学精密机械与物理
研究所获得博士学位,主要从事超高精
密光学元件检测、光学信息融合等方
面的研究。E-mail: suiyx@sklao. ac. cn



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,研
究员,博士生导师,1988 年于哈尔滨工
业大学获得学士学位,1993 年于长春理
工大学获得硕士学位,1996 年于北京
理工大学获得博士学位,现为中科院长
春光学精密机械与物理研究所所长助
理,主要从事网络信息安全、光学信息
融合及紫外光刻技术的研究。Email:
yanghj@sklao. ac. cn