

大口径长焦透镜透射波前的精确测量方案设计

蔡红梅 鄢定尧 朱 衡 鲍振军 胡江川 马 平

中国工程物理研究院,成都精密光学工程研究中心,四川 成都 621900

摘要 大口径长焦透镜是高功率激光系统中必不可少的器件之一,随着装置性能提升,对长焦透镜透射波前包括透射峰谷(PV)值、透射均方根梯度(GRMS)值等,提出了详细的定量技术指标需求。根据长焦透镜焦距特别长的特点,提出了利用准直透镜,大幅缩短长焦透镜检测光路距离干涉检测方法。利用Zemax软件分析了该检测方法的理论误差和调整误差。该检测方法将光路长度由13 m(或33 m),大幅缩短至约5 m,光路受环境温度梯度、气流、震动的影响大幅降低,干涉结果直接显示透射波前畸变。

关键词 测量;大口径;长焦透镜;透射波前;补偿测试

中图分类号 TL23

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1016001

Design of Collimated Wavefront Compensation Test Scheme for Large Aperture Long Focal Length Lens

Cai Hongmei Yan Dingyao Zhu Heng Bao Zhenjun Hu Jiangchuan Ma Ping

Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Large aperture long focal length lens is one of the necessary optics in the high power laser device. Along with the device upgrading, it proposes detailed transmission wavefront including transmission peak valley (PV)、transmission root mean square gradient (GRMS) for long focal length lens. According to the long focal length characteristic, this paper put forward an interference detection method, which utilizes a collimated lens and a compensative lens to shorten the optical path length of the long focal lens detection and compensate the theoretical sphere aberration. Zemax is utilized to analyze and optimize the theoretical error and the distance adjustment error of the detection method. This method significantly shorten the optical path length of the long focal lens detection from 13 m (or 33 m) to about 5 m. The results show the transmission wavefront aberration of the tested lens.

Key words measurement; large aperture; long focal length lens; transmission wavefront; compensation test

OCIS codes 120.1880; 080.3630

1 引 言

长焦透镜在高功率强激光装置中起着空间滤波器的作用,是装置中必不可少的器件之一^[1-4],它能滤除傅里叶频谱中的高频分量、实现像传递、改变光束直径和隔离杂散光,有效地改善系统的光束质量,同时提高系统的可输出功率和可聚焦功率^[5-7]。随着高功率激光装置光束质量、负载能力的需求发展,对长焦透镜的透射波前指标要求透射峰谷(PV)值小于等于 0.333λ , $\lambda=632.8\text{ nm}$ ^[8-9]。对于大口径长焦透镜的透射波前,若直接采用干涉仪准直式光路测量,光路长达十几米至三十几米,这么长距离的光路受气流、温度梯度的影响非常大,是难以采用干涉仪准确测量的。对此类口径的透镜,目前通行的方法主要是采用样板进行子口径检测来判断表面面形,无法得到透镜的透射波前结果。因此,为实现长焦透镜的透射波前指标的工艺控制,首要解决的是其透射波前定量检测问题。

美国国家点火装置(NIF)上的长焦透镜透射波前检测采用的检测光路由大口径平面干涉仪的标准镜头出射一束平行光,经被测长焦透镜,由凸球面反射镜使光线沿原路再次通过被测透镜后返回到干涉仪中,

收稿日期: 2015-04-27; 收到修改稿日期: 2015-06-07

作者简介: 蔡红梅(1982—),女,本科,工程师,主要从事光学加工与检测工艺方面的研究。E-mail: workcai@126.com

检测光束和从标准镜头反射回的参考光束相干叠加产生干涉图,从而测试得到透镜的透射波前结果。

国内针对大口径长焦透镜的透射波前检测的研究不多,可见的报道主要是针对小口径(口径约为 $\Phi 50\text{ mm}$)的球面透镜,检测方法主要有计算机再现全息(CGH)法、补偿法等^[10-13]。一般光学车间对长焦透镜波面质量主要采用样板检测与判断。将小口径的样板放置光学元件上,肉眼观测条纹变化,判断最大光圈 N 和局部光圈 ΔN 。显然样板检测存在的主要问题包括:1)只能观测表面面形,不能检测定量的透射指标;2)只能定性观测小口径范围内的最大光圈 N 、局部光圈 ΔN ;3)为接触式检测,极易在接触表面产生表面疵病。本文根据长焦透镜焦距特别长的特点,提出了利用准直透镜,大幅缩短长焦透镜检测光路距离,同时补偿理论球差的干涉检测方法。

2 方案设计

NIF的检测光路需要大口径凸球面反射镜1件,大口径平面干涉仪1台,且不同类型长焦透镜检测所需大口径凸球面反射镜不同。大口径凸球面反射镜可以是标准凸球面反射镜,也可以是在标准平面反射镜基础上刻蚀的衍射元件。大口径标准凸面反射镜的检测,可以采用更大口径的球面干涉仪或采用拼接的方式检测,但目前并不具备更大口径的球面干涉仪条件,而拼接的精度很难达到标准镜的需求,因此检测条件都较为苛刻;在标准平面反射镜基础上刻蚀衍射元件的做法,需要多家单位协同完成,周期较长,很难在短时间内完成并应用。

因此实验拟采用NIF逆向光路,由球面干涉仪出射一束汇聚球面光,经恰当光焦度的准直透镜,大幅缩短光路距离,再经被测镜,由标准平面反射镜使光线沿原路返回到干涉仪,光路中的球差由靠近猫眼处的小透镜补偿,补偿测试光路初始结构如图1所示(1-球面干涉仪,2-球差补偿镜,3-准直透镜,4-被测长焦透镜,5-平面反射镜)。

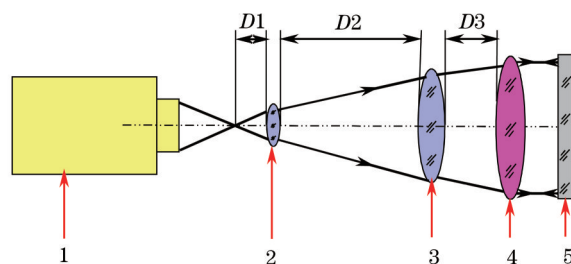


图1 补偿测试光路

Fig.1 Optical schematic of compensation test

由薄透镜光焦度计算公式,长焦透镜光焦度 $\phi_1 = 1/f_1 = (n-1)(C_1 - C_2)$,准直透镜光焦度 $\phi_2 = 1/f_2$,组合系统光焦度 $\Phi \approx \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2$ 。为满足光路长度小于5 m,选择适当的初始参数 $d = 2\text{ m}$ 、 $\Phi = 0.25$,算出准直透镜光焦度 ϕ_2 。

根据像差理论,球差是轴上点成像唯一的单色像差,因此对本系统仅需校正球差。本系统波面像差 $W = W_{040}\rho_4$, W_{040} 为球差系数, ρ 为口径比率, $W_{040} = 0.125S_1$, S_1 为Seidel系数, $S_1 = 0.25y^4\phi^3\sigma$, y 为边缘光线高度, ϕ 为光焦度, $\sigma = aX^2 - bXY + cY^2 + d$, $a = (n+2)/n(n-1)^2$, $b = 4(n+1)/n(n-1)$, $c = (3n+2)/n$, $d = n^2/(n-1)^2$, $X = (C_1 + C_2)/(C_1 - C_2)$, $Y = (1 + M)/(1 - M)$ 。系统像差校正要求系统波像差 $W = 0$,即 $\sum S_i = 0$,将准直透镜,长焦透镜的参数依次代入,算出平凹球差补偿镜球面半径 R 为2200 mm。

3 优化与分析

将初始结构代入Zemax软件优化与分析^[14-16],优化光路如图2所示。光路长度由13 m(或33 m),大幅缩短至6 m以内,光路受环境温度梯度、气流、震动的影响大幅降低,干涉结果直接显示透射波前畸变。该方法所用检测距离远小于透镜焦距,所需准直透镜的口径略小于被测透镜口径。

经过对具体系统的设计,最终使系统的调制传递函数(MTF)曲线很好地匹配衍射极限曲线,故采用波前图来衡量系统的性能。补偿测试光路理论误差如图3所示,PV值为 0.0081λ ,均方根(RMS)值为 0.0015λ 。

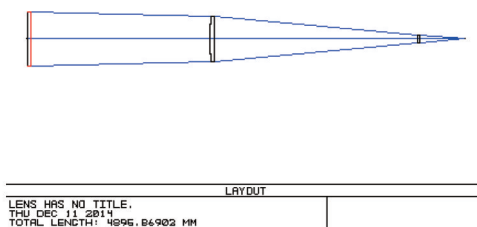


图2 Zemax 优化后光路

Fig.2 Optical path after Zemax optimization

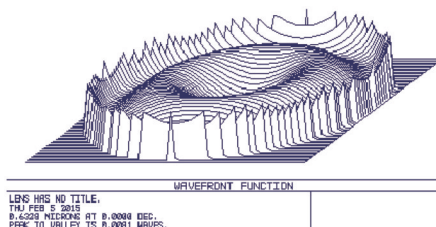


图3 测试光路理论误差

Fig.3 Theoretical error of optical path

工程实施中米级距离的测试和控制精度是极易满足 2 mm 以内的,因此,将图 1 所示补偿测试光路中的距离 D_1 、 D_2 、 D_3 在设计值左右偏离 5 mm 后,自动优化其他距离,距离变化引入的误差接近于理论误差,如图 4 所示,系统容差很大。

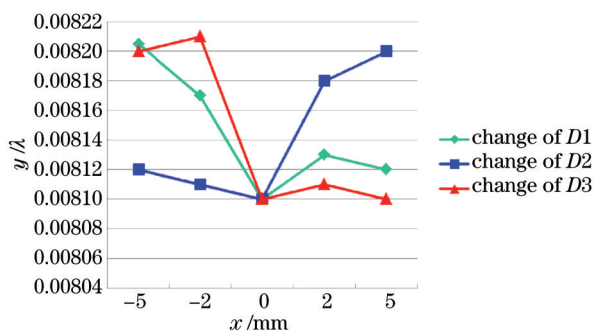


图4 距离调整的误差

Fig.4 Error of the distance adjustment

4 实验

按照如上所述的光路设计,建立长焦透镜透射波前补偿检测系统。检测系统误差包括,设计误差、补偿材料误差、补偿镜面形误差、加工半径误差、调整误差、环境和干涉仪的影响误差等。设计误差,如上所述 PV 值为 0.0081λ 、RMS 值为 0.0015λ 。补偿镜误差包括材料不均匀性误差和表面面形误差。透镜材料采用 JGS1 熔石英,光学非均匀性 $\Delta n \leq 1 \times 10^{-6}$ (这是此类产品的国内厂家可以做到的通常水平,如果优选会更好些),透镜厚度 $d=10$ mm,影响的波像差为 $\delta = d \times \Delta n = 1 \times 10^{-5}$ mm,换算成波长 λ 为单位 $\delta = \delta \times 106/632.8 = 0.015\lambda$, $\lambda=632.8$ nm。补偿透镜全口径为 $\Phi 150$ mm,通光口径为 $\Phi 84$ mm,通光口径 PV 值为 0.071λ ,RMS 值为 0.009λ 。加工半径误差,可以通过透镜间距调整,自动得到最优值,而精度不受影响。通过 20 次蒙特卡罗计算,角度调整误差的影响为最优: 0.0016λ 、最差: 0.0226λ 、平均: 0.0103λ 。该光路对距离不敏感,通过 3 个间距的调整,光路总是能调到一个最优状态,而精度不受影响。本光路采用 4D 公司 Phasecam 4020 动态干涉仪,10 m 以内重复精度小于等于 0.001λ ,RMS 精度小于等于 0.002λ ,测量受环境影响可不予计算。系统总误差为以上各项的均方根值。从以上精度分析可以看出,该系统对于空间滤波器透射 PV 小于等于 0.333λ 的测试需求,所产生的误差都是小量,可以忽略不计的。此外,从工程实施的角度出发,系统设计口径大于测

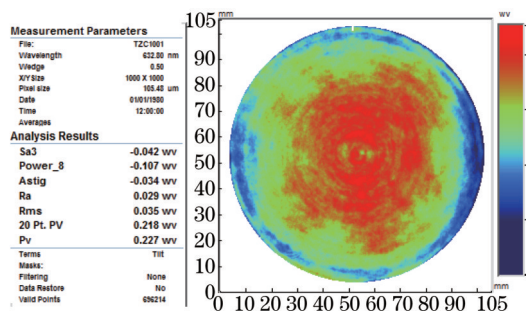


图5 直接测试透射波前 PV 值

Fig.5 Transmitted PV tested directly

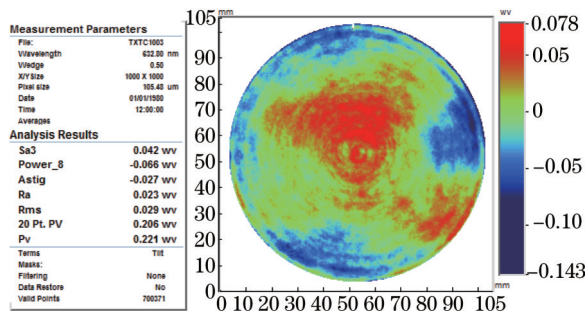


图6 本系统测试透射波前 PV 值

Fig.6 Transmitted PV tested on our test system

试口径为,实际使用精度会更高。

将一件口径为 100 mm, $F/\#=20.62$ 的球面透镜直接测试和采用本测试系统测试,结果分别如图 5、6 所示。采用小口径球面透镜验证时,由测试结果可知,本检测系统测试结果与直接测试结果基本一致。

本测试系统上测试焦距分别为十几米和三十几米的 4 种不同参数的大口径空间滤波器透镜时,采用同一组球差补偿镜和准直透镜,只是需要调整球差补偿镜、准直透镜、被测长焦透镜之间的相对距离即可。在检测系统上检测空间滤波器透镜,并依据检测结果进行加工,将空间滤波器透镜加工至通光口径 410 mm×410 mm 透射波前 PV 值优于 $\lambda/3$, $\lambda=632.8$ nm,透射波前均方根梯度(GRMS)值优于 7.7 nm/cm,分别如图 7、8 所示。实验过程中,检测结果与加工过程相符,且检测结果稳定可靠。

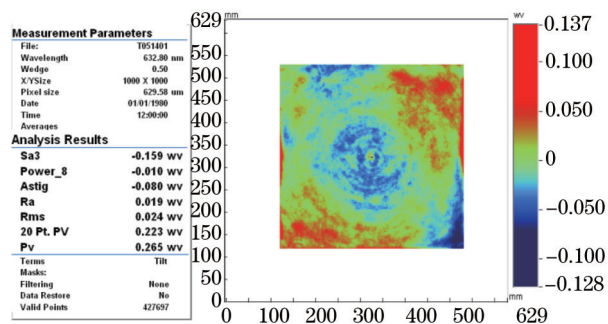


图 7 透射波前 PV 值

Fig.7 Transmitted wavefront PV

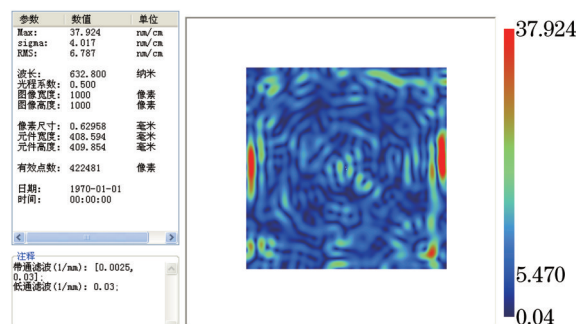


图 8 透射 GRMS

Fig.8 Transmitted GRMS

5 结 论

根据长焦透镜焦距特别长的特点,提出了利用准直透镜,大幅缩短长焦透镜检测光路距离,同时补偿理论球差的干涉检测方法。利用 Zemax 软件分析了该检测方法的理论误差和调整误差。该检测方法将光路长度由 13 m(或 33 m),大幅缩短至约 5 m,光路受环境温度梯度、气流、震动的影响大幅降低,干涉结果直接显示透射波前畸变。该检测方法具有一定的通用性,对 $F/\#>10$ 以上的长焦透镜的透射波前检测都可适用。

参 考 文 献

- Nie Yumei, Qiu Jisi. Important parameters of spatial filter in a high power laser system[J]. Science and Technology Review, 2011, 29(10): 53-56.
聂喻梅, 邱基斯. 高功率激光系统空间滤波器的重要参数[J]. 科技导报, 2011, 29(10): 53-56.
- Simmons W. A high energy spatial filter for removal of small scale beam instabilities in high power solid state laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(9): 852.
- Hunt J T, Renard P A, Simmons W. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filters[J]. Appl Opt, 1977, 16(4): 779-782.
- Simmons W, Speck D R, Hunt J T. Argus laser system: Performance summary[J]. App Opt, 1978, 17(7): 999-1005.
- Xu Shixiang, Guan Fuyi, Lin Zunqi, et al.. Design and measurement of focal lengths of lenses of large f-number used in spatial filters in a high power solid-state laser system[J]. Chinese J Lasers, 1996, 23(12): 1077-1080.
徐世祥, 管富义, 林尊琪, 等. 高功率激光系统空间滤波器透镜焦距的选择及其测量[J]. 中国激光, 1996, 23(12): 1077-1080.
- Xia Lan, Qian Liejia, Wang Shiji. Study and design of spatial filter in high power femtosecond laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(1): 1-4.
夏 兰, 钱列加, 王世绩. 高能飞秒激光系统中空间滤波器的研究和设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 1-4.
- Zeng Taiying, Huang Hongbiao, Zhang Tao, et al.. Stability design and analysis of spatial filter system in Shengguang II facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(7): 1139-1143.
曾台英, 黄宏彪, 张 涛, 等. 神光 II 装置中空间滤波器系统的稳定性设计与分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(7): 1139-1143.
- Christopher J Stolz, Joseph A Menapace, Michael R Borden. Status of optical finishing for the National Ignition Facility[C]. 2002 OSA/OFT: 67-69.
- M L Spaeth, K R Manes, C C Widmayer, et al.. National Ignition Facility requirements and optical architecture[J]. Optical

- Engineering, 2004, 43(12): 2854–2865.
- 10 T G Parham, T J McCarville, M A Johnson. Focal length measurements for the national ignition facility large lenses[C]. 2002 OSA/OFT: 124–126
- 11 Yue Jinying, Lu Zhenwu, Liu Hua, *et al.*. The focal length and transmitted wavefront test for the long-focal length lens[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(2): 252–255.
岳巾英, 卢振武, 刘 华, 等. 长焦透镜焦距及透射波前检测[J]. 光电子·激光, 2010, 21(2): 252–255.
- 12 Yue Jinying, Liu Hua, Xu Wenbin, *et al.*. Measurement of optical surface and foci of long focal length lens by CGH[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optic, 2009, 2(6): 502–507.
岳巾英, 刘 华, 许文斌, 等. 计算全息法测量长焦透镜面形和焦距[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(6): 502–507.
- 13 Hu Zhonghua, Zhu Jing, Yang Baoxi, *et al.*. Far-field multi-parameter measurement of diffractive optical element for pupil shaping in lithography system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908001.
胡中华, 朱 菁, 杨宝喜, 等. 光刻机光瞳整形衍射光学元件远场多参数检测方法[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908001.
- 14 Liu Jiang, Wang Fei, Wang Gaowen, *et al.*. Application of standard intensity insensitive five-step phase-shifting algorithm in projected fringe deflectometry[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1108003.
刘 江, 王 飞, 王高文, 等. 免疫投影基准光强变化的五步移相算法在条纹投影偏折法中的应用[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1108003.
- 15 Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Yin Shaoyun, *et al.*. Design of semiconductor laser shaping system based on hyperbola substrate microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602016.
殷智勇, 汪岳峰, 尹韶云, 等. 基于双曲面基底微透镜阵列的半导体激光器整形系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602016.
- 16 Han Jian, Liu Juan, Liu Dongmei, *et al.*. Optimizing approach of wavefront aberration in the recording of holographic lens based on spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209023.
韩 剑, 刘 娟, 刘冬梅, 等. 基于空间光调制器的全息透镜记录波前像差优化方法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209023.

栏目编辑: 韩 峰