文章编号 2097-1842(2022)05-0992-08

基于差分传递函数法的大口径平面镜检测

安其昌1,2,姜晰文1,2,李洪文1,2,唐 境1,2

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;

2. 吉林省智能波前传感与控制重点实验室, 吉林长春 130033)

摘要:为了实现大口径平面镜的原位检测,本文基于差分传递函数结合瑞奇康芒检测架构,利用全息检测方法结合瑞奇 康芒法,通过光瞳的遮拦编码实现大口径平面镜的面形检测。首先,对基于差分传递函数法的大口径平面镜检测基本原 理进行了推导,并将现有的大口径波前与重建波前进行对比。最后,利用变形镜搭建了检测光路。本文方法所得到面形 与输入面形相关性不低于 70%。本文的研究成果对宇宙"首光"探测以及"一黑两暗三起源"等宇宙学基础命题的研究 均有十分重要的意义。

关键 词:大口径平面镜;全息传感;差分光学传递函数;瑞奇康芒法
 中图分类号:TH751 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2022-0122

Detection of large aperture flat mirror based on the differential optics transfer function method

AN Qi-chang^{1,2}, JIANG Xi-wen^{1,2}, LI Hong-wen^{1,2}, TANG Jing^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Jilin Provincial Key Laboratory of Intelligent Wavefront Sensing and Control, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to realize the in-situ detection of large aperture plane mirrors, wavefront detection is achieved by a combination of the Ritchey-Common method and holographic detection through the differential transfer function, combined with the actual Ritchey-Common detection architecture, and through the occlusion code of the pupil. Firstly, the principle of large aperture plane mirror detection based on differential transfer function method is derived, and the existing large aperture wavefront is compared with the reconstructed wavefront. Finally, the detection light path is built by using deformable mirrors. The correlation between the surface shape obtained by this method and the input surface shape is not less than 70%. This paper is of great significance to the fundamental cosmological propositions such as the detection of the "first

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 62005279);中国科学院青年创新促进会(No. 2020221);中国科学院装备研制 项目(No. YJKYYQ20200057);吉林省科技发展计划(No. 20220402032GH)

收稿日期:2022-06-13;修订日期:2022-07-15

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62005279); the Youth Innovation Promotion Association of CAS (No. 2020221); the Equipment Development Project of the Chinese Academy of Sciences (No. YJKYYQ20200057); Jilin Science and Technology Development Program (No. 20220402032GH)

light" of the universe and the "one black, two dark and three origins". **Key words**: large flat mirror; holographic sensing; differential optical transfer function; Ritchey-Common

1引言

黑洞、暗物质与暗能量、宇宙起源、天体起 源、宇宙生命起源等是近年来天文学界研究的热 点。为了开展以上科学目标研究,通过建造大口 径地基望远镜获得更高的集光面积(与口径平方 成正比)与分辨率(与口径成正比)是非常重要的 技术手段。大口径平面镜作为大口径望远镜研制 过程中的关键器件,其尺寸也随之加大、所承担 的功能也日益增多^[1-3]。

大天区面积多目标光纤光谱望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)中, 对角线为 1.1 m 的 MA 六边 形平面镜,具有主动面形校正能力。欧洲极大望 远镜(Europe-Extremely Large Telescope, E-ELT) 第四镜为2.4m的大口径平面扇形变形镜,用以 校正大气湍流,不论是镜面展平误差还是像差校 正能力,均需要借助高精度的面形检测手段进行 标校。同时其第五镜为一块椭圆镜,不仅可以折 转光路,同时还具有偏摆功能,可校正一部分大气 湍流以及风载所带来的低阶像差;三十米望远镜 (Thirty Meter Telescope, TMT) 第三镜为 3.5 m× 2.5 m的椭圆镜,在系统对目标星体进行跟踪时, 需要将光线在位于奈氏平台上的科学终端间快速 切换。大麦哲伦望远镜(Giant Magellan Telescope) 三镜为 0.6 m×0.4 m 的平面镜,具有四维运动能 力,并可以通过开环查表的方法实现主动光学。 针对以上对于科学目标的重要系统需求,下一代 大口径平面镜的检测场地也不仅局限于光学加工 车间内,在望远镜调试现场也需要进行面形检测 以保证其功能的完整性。

传统使用的平面镜测量设备主要基于干涉 仪,不仅价格昂贵,对环境振动也十分敏感,瑞奇-康芒法是一种历史悠久的检测方法,国内外诸多 大口径标准平面镜都曾使用瑞奇-康芒完成了面 形检测。检测望远镜转折镜时,由于待测镜面上 的椭圆投影,瑞奇-康芒方法的优势将表现得更加 明显:欧洲南方天文台的甚大望远镜(Very Large Telescope, VLT)中的 1.3 m×0.8 m 三镜,即使用了 瑞奇-康芒法进行检测;在 LAMOST 中,对角线 为 1.1 m 的 MA 六边形平面镜安装后的在位检 测也使用了瑞奇-康芒法。故基于瑞奇-康芒检 测方法的应用研究有十分坚实的理论与实验 基础^[48]。

大口径平面镜不论作为望远镜光学系统中的 折返镜还是望远镜自准直检测所使用的标准反射 镜,其面形误差均会耦合进入系统波前。如果不 能很好地控制平面镜的中频面形误差,望远镜系 统将会出现小角度散射、鬼像、耀斑等情况,从而 降低系统的成像质量。本文针对大口径光学平面 更大跨度、更复杂形貌的检测需求,基于瑞奇-康 芒检测架构提出使用数字全息技术,实现在位的 高空间分辨率检测。目前全息感知多为相移探测 通过多次强度测量重建相位[9-12]。针对此情况,本 文引人 VLT 中用于消除非共光路像差的方法—— 差分光学传递方法(differential Optical Transfer Function, dOTF),实现了不附加过多探测器件且有 较高时空分辨率的波前传感,即通过传递函数的 变分,获得对光场的全息估计(同时获得幅值与相 位信息),并结合瑞奇-康芒法的测量边界条件,通 过数字自适应技术,修正最终成像效果中平面光 学元件所引入的误差。通过全息检测为后续图像 处理过程中的反卷积过程提供初始解,提升全局 最优的搜索效率,降低奇异解出现概率。

2 基于 dOTF 波前传感方法

dOTF 是通过检测光瞳面成像相位和复振幅 从而获得波前的技术。

针对某一个子孔径,结合瑞奇-康芒检测光路 的空间布置,计算得到光瞳面的差分光学传递函 数,根据所需形状将获得数据的不规则边缘进行 裁剪(在此假设裁剪为常用的圆形子孔径)如图1 (彩图见期刊电子版)所示。在获得所有离散子孔 径数据后估算整个光瞳面的相位和振幅分布。其 中,子孔径尺寸、数量与孔径的排列方式,综合决 定了所覆盖的空间频率范围。常见的排列方式有 环形,三臂、Golay 型以及复合型。为了便于计算调 制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF), 可将子孔径裁剪为圆形。根据傅立叶光学理论, 不同形式的子孔径采样形式,会对应不同的 MTF。与此同时,为了对测量光路进行更好的对 准,有时需要在子孔径排布时在视场边缘预留添 加定位靶标的区域^[13-16]。



图 1 扎住受分下的标准波則主成分分析结果

Fig. 1 Principal component analysis results of standard wavefront

假设系统波前如式(1)所示:

$$W_0(u) = \exp\left[j\frac{2\pi A}{\lambda}\sin(2\pi uf)\right]$$
, (1)

其中, *f*为空间坐标, *u*为波前的特征频率, *A* 为光 场的幅值, λ为波长, 设光瞳掩模后复振幅为W(*u*)

$$W(u) = \Pi W_0(u) = \Pi \exp\left[j\frac{2\pi A}{\lambda}\sin(2\pi u f)\right] \quad , \quad (2)$$

式中II(x)为光瞳掩模函数。

由傅立叶光学可知,OTF为点扩散函数 (Point Spread Function, PSF)的傅立叶变换,

$$OTF = FFT(W(u)) \quad . \tag{3}$$

dOTF 中被遮挡部分的光瞳函数变化可由下 式表示,

$$\Pi' = \Pi + \delta \Pi \quad , \tag{4}$$

其所对应的光瞳场为,

$$W'(u) = W(u) + \delta W(u) \quad . \tag{5}$$

差分光学传递函数为ΔΠ(x),其可表示为,

$$\delta OTF(u) = W(u)\delta W(u)^* + \delta W(u)W(u)^* + \delta W(u)\delta W(u)^* .$$
(6)

当不考虑重叠区域点时,最终求得光瞳面的 相位和振幅,可由下式表示,

$$\theta[W(u)] = \arctan\left[\frac{\operatorname{img}\left(\delta OTF\left(u\right)\right)}{\operatorname{real}\left(\delta OTF\left(u\right)\right)}\right] \quad , \qquad (7)$$

$$A[W(u)] = |\delta OTF(u)| \quad . \tag{8}$$

主成分分析可有效判断求解过程对基底正交 性的影响,借助主成分分析,针对低阶像差构建样 本库,如图 2(彩图见期刊电子版)所示。由图 2 可得,通过差分传递函数方法所解算的基本像差 模式,保持了其原有的空间频率特征。



994



图 2 对彗差与像散混合波前的差分光学传递函数解算幅 值(a)及相位(b)

Fig. 2 (a) The amplitude and (b) phase calculated by the differential optical transfer function for the mixed wavefront of coma and astigmatism

3 基于 dOTF 的波前传感实验验证

采用光瞳遮挡的方式,分别生成两幅光学传 递函数图像,再将两幅光学传递函数图像做差之 后进行傅立叶变换,得到光瞳面相位和振幅分布 的一组数据。遮挡中心零级像,重复测量求平均, 再解算差分光学传递函数,以降低随机噪声的影 响。针对彗差与像散的复合低阶像差进行差分光 学传递函数解算,其初始点扩散函数与遮拦后的 点扩散函数如图 3(彩图见期刊电子版)所示。

利用结构函数可对不同波动尺度的误差进行 解算,从定义的角度来看,结构函数表征的是特定 尺度内,所包含湍流的总能量,后来被引入系统波 前的评价之中,用以表征特定尺度下,由于不同的 加工手段或支撑方式,所引入的面形起伏。对2m 级大口径反射镜面形进行差分光学传递函数解 算,其对应结构函数如图4~图5(彩图见期刊电子 版)所示。针对原始波前与解算波前进行相关运 算,得其相关系数高于70%,可有效指导平面镜的 检测与集成。波前的结构函数的基本定义如下:

$$SF(\lambda f) = \left\langle \left[W(u) - W(u + \lambda f) \right]^2 \right\rangle \quad . \tag{9}$$

设光瞳掩模后复振幅为W(u), λ为波长, ‹›表 示在波前上的平均。通过分析结构函数可知, 对 于高频段具有部分截断效应, 其原因在于, 进行全 息探测的系统, 其光电感知环节为离散形式, 不可 能拥有无限高的分辨率。实际上,面形检测主要 面向中低频误差,对高阶误差的检测需求不高。



图 3 孔径变分前(a)、后(b)焦斑能量分布

Fig. 3 Energy distributions of the focal spot before (a) and after (b) aperture variation

在瑞奇-康芒检测应用方面,中国科学院西安 光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密 机械与物理研究所(简称长春光机所)、南京理工 大学、中国科学院国家天文台南京天文光学技术 研究所均进行了大量的研究,并获得多项成果。 2010年,中国科学院西安光学精密机械研究所的 樊学武等人使用光线追迹方法,分析了系统误差 对检测结果的影响,并对 90 mm 平面镜进行了检 测^[17]。2013年,长春光机所的朱硕结合坐标变换 与最小二乘估计,在不同反射角度下获得瑞奇-康 芒的检测结果,以降低系统失调误差的影响^[18]。 2018年,南京理工大学的刘一鸣利用被检测平面 镜 Zernike 系数与干涉仪光瞳面所测结果间的对 应关系,对 90 mm 平面镜进行了面形检测^[19]。



图 4 2 m 级大口径反射镜面形差分光学传递函数解算结果。(a)原始波前;(b)恢复波前;(c)原始波前结构函数;(d)恢复 波前结构函数

Fig. 4 Differential optical transfer function solutions for a 2 m level large aperture mirror shape. (a) Original wavefront. (b) Recovered wavefront. (c) Original wavefront structure function. (d) Recovered wavefront structure function





Fig. 5 Cross correlation function between the original wavefront and restoration's result

平面镜工作状态下的复检过程中,过多的子 孔径也会造成信息冗余。合理地降低子孔径数 量,将互相重叠的子孔径脱离为离散子孔径,并结 合适当的评价指标,可以更好地发挥子孔径检测 中频面形的优势。对于单个子镜数据的获取,可 使用斐索式平面干涉仪,但其成本随着口径增大 急剧升高,同时对外界振动十分敏感。这限制了 其应用口径与工作环境。离散孔径与瑞奇-康芒 法的结合可以大幅降低大口径平面镜的检测成 本,提升效率以及扩宽检测的环境适应性。由于 检测的最终目的为获取相应的面形数据,因此需 要对面形数据的获取过程进行研究[20-21]。波前重 建方法分为区域法与模式法,在本项目中采用模 式法。通过差分光学传递函数获得子孔径波前, 并利用 Zernike 基底进行拟合, 最终获得完整的波 前。基于差分传递函数法的大口径平面镜离散孔 径检测架构如图 6(彩图见期刊电子版)所示。针 对低阶像差组合的原始波前与重建波前如 图 7(彩图见期刊电子版)所示。对应的 Zernike 系 数对比如图 8(彩图见期刊电子版)所示。首先对 待测系统所关心的空间频率进行分析,保证稀疏 孔径采样可实现对特征频段的覆盖,其次,构建 瑞奇-康芒检测架构,分析具体配置所引入的误 差;最后,进行全息测量,即分别得到遮拦与无遮 拦的星点像,并利用泛函分析获得波前光场信息。



图 6 基于全息瑞奇-康芒检测大口径平面镜离散孔径检测架 构。(a)光瞳架构;(b)检测光路;(c)孔径变分解算过程

Fig. 6 Large aperture planar mirror discrete aperture detection architecture based on holographic Ritchey-Common detection. (a) Pupil architecture. (b) Detection optical path. (c) Aperture variational calculation process





front of low-order aberration combination



- 图 8 原始波前与重建波前对应的 Zernike 系数对比
- Fig. 8 Comparison of Zernike coefficients corresponding to the original wavefront and the reconstructed wavefront

该系统不仅可以对单镜大口径光学系统进行 自准直测试,同时,对拼接式的大口径平面镜 (LAMOST等六边形拼接式平面镜)也同样适 用。其不仅可以获得波前光场信息(强度与相位), 实现对最终图像退化的定量预测,还可以通过感 知拼接边界所引入的波前异变,实现对各子镜位 姿的精准调控。为验证本文所提方法的可行性与 准确性,搭建了实验平台。通过准直透镜扩束,并使 用分段式平面变形镜引入所需像差(彗差1个波 长),最终使用一个F数较小的透镜,实现大视场 系统的模拟。波前全息解算结果可与所加入的像 差具有相同模式,解算得到的幅值与相位信息以 及实现装置图如图9(彩图见期刊电子版)所示。



- 图 9 解算得到的(a)幅值与(b)相位信息以及(c)实现装置图
- Fig. 9 (a) The amplitude and (b) phase information obtained from the solution and (c) the implementation device

4 讨 论

本质来看,利用孔径变分与利用相位差异的 波前传感方法相同,均为通过增加可控摄动,实现 多参量影响的解耦与测量。在检测过程中,遮拦 大小需要进行若干次迭代试验确定,遮拦过小,将 导致检测信噪比下降(变分所引入的焦斑异变被 探测器本底噪声以及杂散光等干扰因素淹没)。 而遮拦过大,会导致波前信息的混叠,从而无法准 确提取波前信息。

针对大口径平面镜研制中亟待解决的问题: 中空间频段面形检测问题,基于瑞奇-康芒法覆 盖口径大,空间覆盖能力强的特点,利用光线的 相似原理,在口径较小位置利用标准球面镜对波 前检测结果进行标定。通过较小口径的标准平面 镜或球面镜,可实现系统的精度溯源与精度传递。

5 结 论

面向大口径平面镜原位面形检测需求,针对 集成检测所对应的特征空间频率,基于离散孔径 瑞奇-康芒检测架构,结合全息波前检测,可实现 高精度、高稳定性面形检测。其与输入面形相关 性不低于 70%,可保障平面镜系统重复集成(运输 组装、重新镀膜等)精度,最终实现望远镜高分 辨、高灵敏度成像。通过对单个元件对应全息光 场的计算,为最终数字自适应解卷积提供初始 解。与纯盲解卷积相比,利用内部度量系统进行 的像获取,通过去除变化缓慢幅值大的分量,对系 统的波前畸变进行初步修正,可有效提高最终数 字自适应解算结果的收敛特性。解决了数字自适 应实时性差、无法在线校正的难题。

参考文献:

- [1] CUI X Q, ZHU Y T, LIANG M, *et al.*. Introduction on Chinese 12m optical/infrared telescope (LOT)[J]. *Proceedings* of SPIE, 2018, 10700: 107001P.
- [2] BOUCHEZ A H, ANGELI G Z, ASHBY D S, *et al.*. An overview and status of GMT active and adaptive optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10703: 107030W.
- [3] KORKIAKOSKI V, KELLER C U, DOELMAN N, *et al.* . High-order wavefront correction with a spatial light modulator: calibrations with dOTF method[C]. *Proceedings of Adaptive Optics: Methods, Analysis and Applications 2013*, Optica Publishing Group, 2013.
- [4] RODACK A T, KNIGHT J M, CODONA J L, et al.. Adaptive optics self-calibration using differential OTF (dOTF)[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9605: 96052B.
- [5] KIM D W, OH C J, LOWMAN A, *et al.*. Manufacturing of super-polished large aspheric/freeform optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9912: 99120F.
- [6] STUHLINGER T W. Subaperture optical testing: experimental verification [J]. Proceedings of SPIE, 1986, 656: 118-127.
- [7] CHEN SH Y, DAI Y F, LI SH Y, *et al.*. Error reductions for stitching test of large optical flats [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(5): 1543-1550.
- [8] KIM C J. Polynomial fit of subaperture interferograms [J]. Proceedings of SPIE, 1983, 351: 28-41.
- [9] TROLINGER J D. The language of holography [J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 473-481.
- [10] ZHANG J W, DAI S Q, MA CH J, *et al.*. A review of common-path off-axis digital holography: towards high stable optical instrument manufacturing[J]. *Light:Advanced Manufacturing*, 2021, 2(3): 333-349.
- [11] FRATZ M, SEYLER T, BERTZ A, et al.. Digital holography in production: an overview[J]. Light:Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 283-295.
- [12] BONNET H, BIANCAT-MARCHET F, DIMMLER M, et al.. Adaptive optics at the ESO ELT[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10703: 1070310.
- [13] WOLFE C R, DOWNIE J D, LAWSON J K. Measuring the spatial frequency transfer function of phase-measuring interferometers for laser optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2870: 553-557.
- [14] PARKS R E. Optical surface specification using the structure function[C]. *Proceedings of Optical Fabrication and Testing 2010*, Optica Publishing Group, 2010: OWE3.

- [15] SEO B J, NISSLY C, ANGELI G, et al.. Analysis of normalized point source sensitivity as a performance metric for large telescopes [J]. Applied Optics, 2009, 48(31): 5997-6007.
- [16] STOKES A J, DUNCAN B D, DIERKING M P, et al.. Improving mid-frequency contrast in sparse aperture optical imaging systems based upon the Golay-9 array[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 4417-4427.
- [17] 孔小辉, 樊学武, 马臻, 等. 大口径平面镜的计算机辅助瑞奇-康芒检验[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 984-988.
 KONG X H, FAN X W, MA ZH, *et al.*. Computer added Ritchey-Common test for large flat mirror measurement[J].
 Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 984-988. (in Chinese)
- [18] ZHU SH, ZHANG X H. Eliminating alignment error and analyzing Ritchey angle accuracy in Ritchey-Common test[J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 368-374.
- [19] 刘一鸣,李金鹏,陈磊,等.采用单位激励影响矩阵数值计算的瑞奇-康芒检测技术[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(4): 771-777.

LIU Y M, LI J P, CHEN L, *et al.*. Ritchey-Common interferometry using unit-excitation influence matrix's numerical calculation method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 771-777. (in Chinese)

[20] 白晓泉, 郭良, 马宏财, 等. 离轴三反望远镜轴向与横向失调量像差耦合特性[J]. 中国光学 (中英文), 2022, 15(4): 747-760.

BAI X Q, GUO L, MA H C, *et al.*. Aberration coupling characteristics of axial and lateral misalignments of off-axis three-mirror telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 747-760. (in Chinese)

[21] 冯维, 徐仕楠, 王恒辉, 等. 逐像素调制的高反光表面三维测量方法[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 488-497.
 FENG W, XU SH N, WANG H H, *et al.*. Three-dimensional measurement method of highly reflective surface based on per-pixel modulation[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 488-497. (in Chinese)

作者简介:



安其昌(1988—),男,山西太原人,博士,助理研究员,中国科学院青年创新促进会成员。2011年 于中国科学技术大学获得工学学士学位,2018年于中国科学院大学获得博士学位,研究方向为大 口径光机系统检测装调。E-mail: anjj@mail.ustc.edu.cn