

文章编号 1004-924X(2017)08-2023-06

复合式多点测量速度干涉仪光学系统设计

闫亚东*, 何俊华, 许瑞华, 韦明智, 李奇
(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘要:为满足爆炸冲击作用下物质界面的速度测量需求,设计了一种复合式多点测量的速度干涉仪。采用物方和像方双远心光路,将光纤阵列出射的照明激光定点投射到待测物面上,实现了针状滴注式照明,充分利用了照明激光能量,且保证了待测物面在运动过程中具有恒定的照度。成像系统像面采用末端为大芯径的锥形光纤接收信号光,既保证了物面运动过程中信号光与光纤的有效耦合,又保证了信号的单模输出,以便进入单模光纤马赫-曾德干涉仪进行差频干涉。采用具有微小楔角、沿直径方向镀矩形带状 45° 反射膜的反射镜,将照明光路与成像光路同轴,并校正了成像系统的大量像散。该干涉测量系统在物面运动10 mm的行程中,物面滴注式照明照度保持恒定,像面光斑大小没有超出大芯径的光纤芯径。此光学系统能够满足爆炸冲击界面的大行程速度测量需求。

关键词:爆轰波;速度干涉仪;远心光路;锥形光纤

中图分类号:TH744.3;TH824 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2023

Optical system design of compound multi-point measurement velocity interferometer

YAN Ya-dong*, HE Jun-hua, XU Rui-hua, WEI Ming-zhi, LI Qi

(Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: yyd@opt.ac.cn

Abstract: In order to measure velocities of explosion loading surface driven by blast waves, a compound velocity interferometer was introduced. The illumination laser from fiber array was projected onto the target surface through a telecentric optical imaging system. Only several points on the target were illuminated, which got the utmost out of laser power. The illumination beam had so small numerical aperture that the illumination spot size kept constant while the target moving within 10 mm. A taper fiber array with large core diameter was mounted on the image surface of optical imaging system, thus the signals could coupled into the large core fibers effectively and could output in single mode for difference interference in single mode Mach-Zender interferometer during the target movement. A 45° beam splitter with a small wedge angle was employed before the first optical element of the imaging system, the illumination laser could be reflected to the object surface by the rectangular films on the first surface of the splitter. The small wedge angle of the splitter could compensate the astigmatism lead by tilted parallel plate. During the object surface moving within 10 mm, the lighting

收稿日期:2016-12-27;修订日期:2017-02-04.

基金项目:国家教育部博士点(西部)基金资助项目(No. 200929441213)

power and spot sizes on object surface remain the same, and the coupling efficiency of Doppler frequency shift signals also remain constant. This optical system could meet the demand of explosion loading surface velocity measurement in long distance range.

Key words: detonation wave; velocity interferometer; telecentric optical system; taper fiber

1 引言

爆轰波与物质的相互作用是爆轰研究、爆炸效应研究的核心内容,物质在爆轰波作用下表面的速度测量是研究爆轰波与物质间相互作用的重要途径。

在速度测量方面,任意反射表面速度干涉仪^[1-2](Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)因具有对测量面无特殊要求、测量精度高等优点,而在冲击界面速度测量中得到了广泛的应用^[3-8]。在国外,1968年 L. M. Barker 提出采用差频干涉、光电倍增管接收测量飞片驱动镜面靶速度的干涉仪;1972年, L. M. Barker 提出了一种光电倍增管接收的 VISAR,这是激光测速的里程碑;1977年, N. L. Parker 和 H. H. Chau 采用条纹相机代替光电倍增管,大幅提升了系统的时间分辨率;1990年,美国洛斯·阿拉莫斯实验室提出了一种多点测速干涉仪;1996年,以色列人 L. Levin 提出了构紧凑、体积小的光纤速度干涉仪。在国内,在爆轰物理研究领域,1981年出现了激光位移干涉仪,1992年出现了光纤速度干涉仪,1998年出现了多点测速光纤干涉仪,2005年出现了双灵敏度光纤速度干涉仪;在激光聚变领域,2008年基于激光聚变装置建立了第一台双灵敏度光学成像型速度干涉仪,随后激光测速技术得到了快速发展,研究人员建立了耦合被动式测速系统于一体的主被一体复合测速系统。经过几十年的发展,多种型号的速度干涉测量系统应运而生^[9-10],但不同应用领域的速度干涉仪具有不同的要求,导致干涉仪的通用性不强。应用于激光聚变中的 VISAR^[11]具有测速上限高(几十 km/s)、高物方分辨(几微米)、非接触式测量、抗辐射等优点,但它的光路十分复杂、体积大、光学景深很小(几百微米)。应用于较低速度测量的全光纤 VISAR 具有结构简单、体

积小等优点,但它的信号收集能力有限、距离待测面近,易于遭到冲击破坏,通常是一次性的,不能重复使用。

为满足爆轰实验中大景深、较大工作距、较强信号收集能力、多点测试、长寿命的需求,本文设计了一种复合式 VISAR 方案。它结合透镜成像型 VISAR 和全光纤 VISAR 的优点,照明光路和信号收集光路采用透镜结构,干涉光路采用光纤结构。为了实现大景深测量,提出了针状滴注式定点照明的方案,该方案有效利用了照明激光能量,同时在测量过程中保证待测点的照明功率恒定。提出采用锥形光纤耦合信号光,锥形光纤具有更大的芯径,能够解决单模光纤因物面运动而离焦所导致的信号强度变弱的问题。采用具有微小楔角、沿直径方向镀矩形带状 45°反射膜的反射镜,将照明光路与成像光路同轴;微小楔角校正了成像系统的大量像散,矩形带状反射膜避免了普通半透半反分束镜引起的能量损失。系统的信号集光数值孔径为 0.05,具有多点测速能力,能够满足爆轰实验的需求。

2 原理光路

复合式多点测量速度干涉仪的原理光路如图 1 所示,系统由照明光路和成像光路两部分构成。

在照明光路中,照明激光器发出的激光经光纤输出,利用 1 分 8 分束器将输出光纤分为 8 根,并紧密排列,然后利用一个物方和像方均为远心光路的放大光学系统将光纤端面投射到待测靶面上。由于单模照明光纤的数值孔径较小,经过放大光学系统后,在靶面方照明光束的数值孔径急剧减小,照明光束形如一根根针一样投射到待测靶面。这样靶面在一定区域内轴向移动时,照明光斑由照明系统的衍射艾里斑决定。这种定点“滴注式”照明方式不仅极大提高了照明激光的利用效率,还可在靶面运动中使待测点始终保持稳

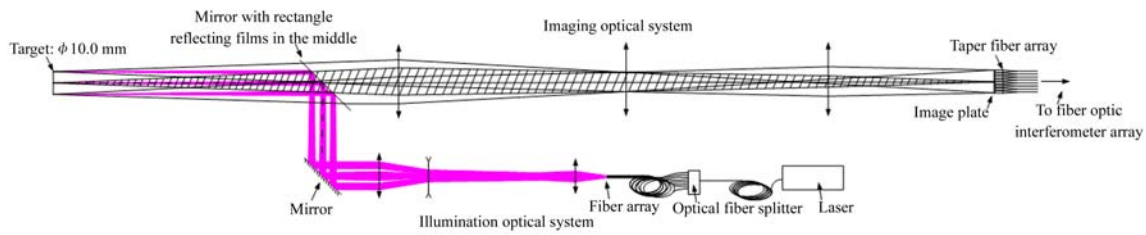


图 1 复合式测速系统原理光路

Fig. 1 Optical principle of compound velocity interferometer

定的照明功率。

在成像光路中,靶面被照明点发出的信号光经成像系统会聚并耦合入光纤,然后进入光纤干涉仪进行差频干涉,最后由记录设备记录干涉仪的输出信号。由于靶面待测点和像面接收光纤均为并行排列,因此成像光路的物方和像方均采用远心光路。在靶面运动的过程中像面光斑会因离焦而变大,将接收光纤设计为锥形光纤,以保证信号强度的稳定。

3 光学系统设计

复合式测速系统的光学系统总体结构如图 2 所示,系统由照明光学系统和成像光学系统两部分构成,二者经一块特殊的分束镜实现光路共轴。系统的靶面为 $\varphi 10\text{ mm}$;待测点数为 8 个,沿靶面直径“一”字排列;照明激光波长为 $1\ 550\text{ nm}$ 。

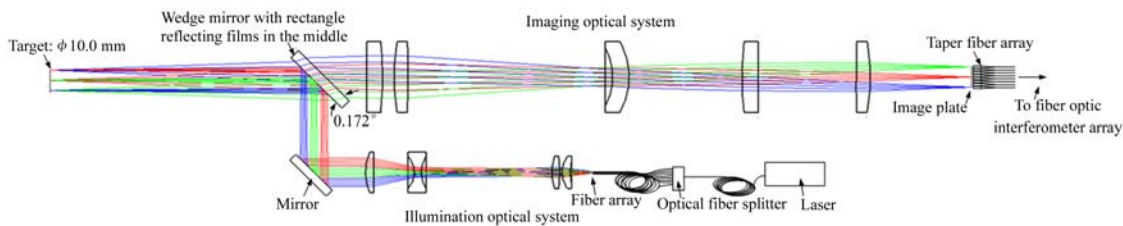


图 2 复合式干涉仪光路结构

Fig. 2 Light path of compound velocity interferometer

3.1 照明光学系统设计

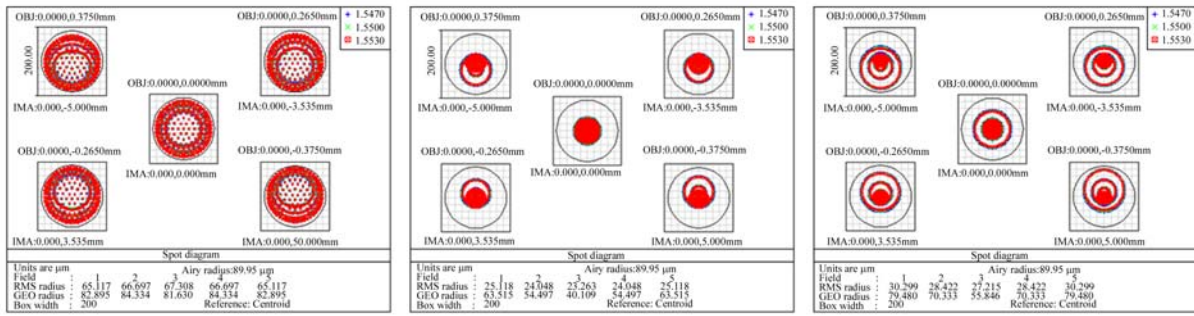
照明光学系统的功能是用波长为 $1\ 550\text{ nm}$ 激光器发出的激光照明待测靶面。为提高多点测速系统的激光利用率,提出了只对待测点“定点”照明的方案。首先用光纤分束器将光源分为多个独立点光源,并排成“一”字。然后用照明光学系统将独立点光源投射到靶面上实现多点照明,通过控制照明光学系统的放大倍率可控制照明点的位置,从而实现“定点”照明。

因待测靶面的运动行程较大,为保证待测点离焦后照明功率不变,提出了远心光路“针”状照明的方案。在靶面一定的情况下,系统通过尽可能紧密地排布照明光纤来提高照明光学系统的放

大倍率,减小照明系统在靶面方的数值孔径,使照明光束形如一根根“针”。这样靶面在一定范围内移动时,照明光斑由衍射艾里斑决定,待测点的照明功率和照明光斑均保持恒定。

在图 2 所示的照明光路中,采用的是 1 分 8 的单模光纤分束器,分束后将光纤端部紧密排列成“一”字作为物面,经过照明光学系统将之投射到直径为 10 mm 的靶面上。

系统在靶面上照明点的点列图如图 3 所示,由图可见,靶面在 10 mm 的运动行程内,照明点的几何弥散斑均小于系统的衍射艾里斑(半径为 $89.95\ \mu\text{m}$),照明光斑始终保持为衍射艾里斑直径。



(a)离焦量为-5 mm (b)焦面处 (c)离焦量为+5 mm
 (a)Defocus of -5 mm (b)Focal plane (c)Defocus of +5 mm

图 3 照明光学系统的像点点列图

Fig. 3 Spot diagrams of illumination optical system

3.2 信号光收集光学系统设计

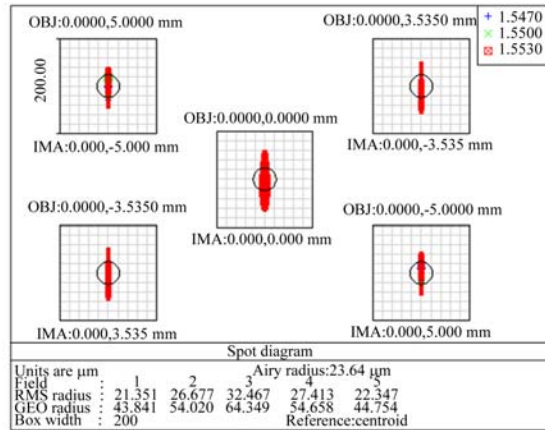
信号光收集光学系统的功能是:在靶面运动过程中收集从待测点散射的信号光,并将之耦合入单模光纤干涉仪进行差频干涉。

因光纤干涉仪的芯径很小,即便光学系统的聚焦效果很好、能够与单模光纤实现很好的耦合,但当靶面因运动而离焦时光纤端面处的光斑会迅速增大,导致耦合效率急剧降低,这无法满足靶面大行程运动时速度测试的需求。为了解决上述问题,本文提出了采用锥形光纤耦合的方案。锥形光纤一端为大芯径光纤(600 μm),另一端为单模光纤;其前端用于与信号光耦合,后端用于与干涉仪连接。它是一个等比放大成像系统,物方数值孔径为 0.05。为了保证靶面上不同点的散射光取样、耦合的一致性,光学系统的物方和像方均采用远心光路。这样,各点散射光取样的角度完全一致、散射光的取样立体角完全一致,各点聚焦后的光束与光纤耦合时的入射角完全一致、相对光纤的数值孔径完全一致。

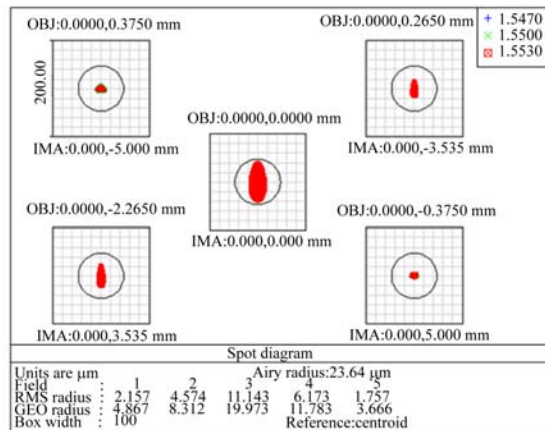
为了使照明光学系统和信号光收集光学系统共轴(见图 2),设计了一种特殊的楔形 45°分束镜。它在分束镜前表面沿直径方向宽 2.5 mm、长 20 mm 的矩形区域镀 45°高反膜,在其它区域及后表面镀 45°增透膜。这样,分束镜对照明光路全反射,对成像光路只遮挡 10%,有效避免了由半透半反镜导致的更大的能量损失(约为 75%)。

平行平板分束镜会给信号收集光路带来大量像散,如图 4(a)所示。为了降低这种像散,将分束镜的楔角设计为 0.172°,系统的像散大幅降

低,分辨能力达到了衍射极限,如图 4(b)所示。



(a)用平行平板分束镜的系统
 (a)Optical system with tilted parallel plate



(b)用楔形分束镜的系统
 (b)Optical system with wedge splitter

图 4 信号光收集光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagrams of signal collecting optical system

信号光收集系统的光学传递函数如图 5 所示,在 25 lp/mm 处传递函数达到 0.3。系统在靶面离焦 -5 mm 和 +5 mm 时的聚焦光斑如图 6 所示,由图可见,离焦后系统像点的弥散斑直径最大为 421 μm 。考虑到照明光斑大小为 180 μm ,两个因素共同作用,使耦合光斑的最大直径接近 600 μm ,与锥形光纤大芯径一端相当。由此可见,

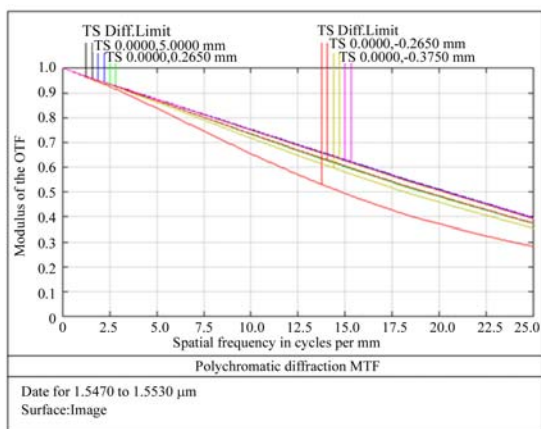
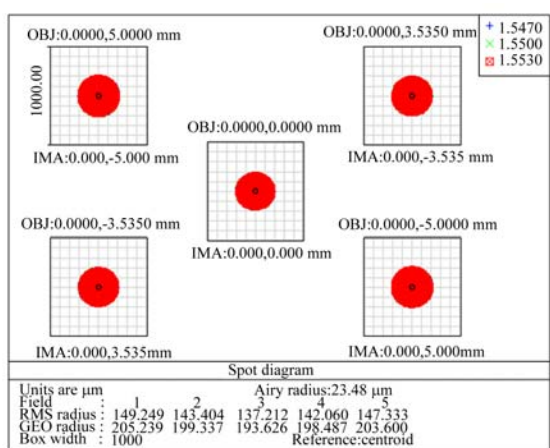


图 5 信号接收光学系统传递函数

Fig. 5 MTF of signal collecting optical system



(b)离焦量为+5 mm

(b)Defocus of +5 mm

图 6 信号光收集光学系统离焦后光斑变化

Fig. 6 Spot diagrams of defocused signal collecting optical system

锥形光纤可以保证靶面运动过程中耦合效率的稳定,从而保证干涉仪记录系统信号强度的稳定。

4 结 论

本文提出了一种复合式 VISAR。该系统的“针”状、定点滴注式、双远心照明系统提高了照明激光的利用效率,保证了靶面运动过程中待测点照明功率的稳定性。信号光收集系统的双远心光路保证了各点信号强度的一致性,锥形光纤保证了靶面运动过程中信号光的有效耦合。中心镀膜矩形反射膜的分束镜在实现了照明光路与成像光路共轴的同时,避免了半透半反镜带来的大量能量损耗;分束镜的微小楔角消除了平行平板分束镜引入的大量像散。设计结果表明,该测速系统能够满足爆轰实验中深景深、较大工作距、较强信号收集能力以及多点测试的需求。

shock waves[J]. SPIE, 1983, 348: 523-528.

[3] MALONE R M, MOUROULIS P Z, SMITH W J, et al. Design of an imaging VISAR diagnostic for the National Ignition Facility (NIF)[J]. SPIE, 2003, 5173: 26-37.

[4] LANDEN O L, GLENZER S H, FROULA D H, et al. The first target experiments on the National Ignition Facility[J]. The European Physical Journal D, 2007, 44(2): 273-281.

参考文献:

[1] MALONE R M, BOWER J R, BRADLEY D K, et al. Imaging VISAR diagnostic for the National Ignition Facility (NIF)[J]. SPIE, 2005, 5580: 505-516.

[2] BLOOMQUIST D D, SHEFFIELD S A. Optically recording velocity interferometer system (ORVIS) for subnanosecond particle velocity measurements in

- [5] MALONE R M, CELESTE J R, CELLIERS P M, *et al.*. Combining a thermal-imaging diagnostic with an existing imaging VISAR diagnostic at the National Ignition Facility (NIF)[J]. *SPIE*, 2005, 5874: 587409.
- [6] MALONE R M, BOWER J R, CAPELLE G A, *et al.*. Fielding of an imaging VISAR diagnostic at the National Ignition Facility (NIF)[J]. *SPIE*, 2004, 5523: 148-157.
- [7] 彭晓世, 王峰, 唐道润, 等. 利用成像型任意反射面速度干涉仪测量石英中的冲击波速度[J]. *光子·激光*, 2011, 22(9): 1401-1404.
PENG X SH, WANG F, TANG D R, *et al.*. Shock wave velocity measurement in quartz using an imaging velocity interferometer for any reflector[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(9): 1401-1404. (in Chinese)
- [8] 刘寿先, 彭其先, 雷江波, 等. 激光驱动飞片的线面成像 VISAR 测速技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(8): 081008.
LIU SH X, PENG Q X, LEI J B, *et al.*. Line-imaging and framing plane-imaging velocity interferometer for laser driven flyer diagnostics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(8): 081008. (in Chinese)
- [9] 闫亚东. 成像型双灵敏度 VISAR 关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
YAN Y D. *Key Technical Researches on Double Sensitivity Imaging VISAR*[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [10] 冯阳. 全光纤 VISAR 技术的研究与应用[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
FENG Y. *Research and Application of All Fiber Velocity Interferometer System for Any Reflector* [D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese)
- [11] 闫亚东, 张法全, 何俊华, 等. 神光-III 原型装置用速度干涉仪的光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2355-2361.
YAN Y D, ZHANG F Q, HE J H, *et al.*. Design of VISAR optical system for Shen-Guang-III prototype[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2355-2361. (in Chinese)

作者简介:



闫亚东(1979—),男,河南周口人,博士,副研究员,主要从事强激光精密诊断与应用技术的研究。E-mail: yyd@opt. ac. cn



何俊华(1968—),男,江西人,研究员,博士生导师,主要从事水下光电成像与探测技术、强激光精密诊断与应用技术的研究。E-mail: hjh@opt. ac. cn