

光子多普勒测速仪多目标点探头光学设计

吴慎将, 孙奕晗, 荆宇强, 朱星宇, 马文珊

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为了提升光子多普勒测速仪 (Photon Doppler Velocimetry, PDV) 对目标进行多点数的区域覆盖式或阵列式速度测量时的测量点数量, 使用 Zemax 软件设计了像面直径 10 mm 的双远心光学系统, 实现同时对平面靶 5.6 mm 范围内进行多点测速。该镜头由 4 片单透镜和 4 片双胶合透镜组成, 工作波长为 1 550 nm, 工作物距为 300 mm, 系统总长 250 mm, 有效焦距 500 mm, 远心度小于 0.01° , 均方根半径在聚焦位置处最小为 $0.055\ \mu\text{m}$, 最大为 $0.920\ \mu\text{m}$ 。均方根半径及全部弥散斑半径均在艾里斑范围内, 调制传递函数曲线与衍射极限重合, 线条平整, 系统达到衍射极限。同时畸变小于 0.025%, 像差校正满足设计要求。

关键词: 光学设计; 双远心镜头; 远心度; 像差校正

中图分类号: U471

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)05-081-08

Optical Design of a Probe for Multipoints Photon Doppler Velocimetry

WU Shenjiang, SUN Yihan, JING Yuqiang,
ZHU Xingyu, MA Wenshan

(School of OptoElectronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi)

ABSTRACT: In order to increase the number of measurement points of photon Doppler velocimetry (PDV) in coverage or array velocity measurements of multipoints of the target, a double telecentric optical system with an image plane diameter of 10 mm was designed by Zemax software. The proposed optical system could measure velocities of multipoints within 5.6 mm of a plane target simultaneously. The lens consisting of four single lenses and four doublet lenses had a working wavelength of 1 550 nm, a working object distance of 300 mm, a total system length of 250 mm, an effective focal length of 500 mm, a telecentricity less than 0.01° and a root-mean-square (RMS) radius of $0.055\ \mu\text{m}$ at the minimum and $0.920\ \mu\text{m}$ at the maximum at the focus position. The RMS radius and radii of all defocused spots were within the range of Airy spots. Moreover, the modulation transfer function curves was flat and overlapped with the diffraction limit with flat lines, which indicated that the system has achieved the diffraction limit. Meanwhile, the aberration was less than 0.025%, and the aberration correction met the design requirements.

KEYWORDS: optical design; double telecentric lens; telecentricity; aberration correction

收稿日期: 2024-05-12

基金项目: 应用物理化学国家级重点实验室基金 (WDYX21614260202)

第一作者: 吴慎将 (1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事光学检测、激光与物质相互作用研究。E-mail: wsj@xatu.edu.cn

引用格式: 吴慎将, 孙奕晗, 荆宇强, 等. 光子多普勒测速仪多目标点探头光学设计[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (5): 81-87, 118.

在 20 世纪 60 年代, 光子多普勒测速技术 (Photonic Doppler Velocimetry, PDV) 问世, 随着科技水平的发展和研究的不断深入, 该技术逐渐成为测量高速运动物体瞬时速度的重要方式。同时该技术的应用领域也很多, 如恢复喷射场^[1]、观察由于冲击诱导的弹性波传播而导致的远端表面运动^[2]、铜钢管接头电磁脉冲焊接过程中的冲击速度^[3]、三氨基尿嘧啶甲苯 (Triamino Trinitrobenzene, TATB) 的爆轰实验^[4]等。

在测速过程中, 探头起着至关重要的作用, 探头是 PDV 获取目标信息的重要手段。毕重连团队^[5]使用多根裸光纤组成探头替代原有的自聚焦透镜探头, 提高了分辨率。李旭团队^[6]则是通过利用自聚焦透镜自身体积小且结构简单的优点测量近场冲击波。黄雪峰团队^[7]提出通过使用双芯光子晶体光纤作为探头, 接收多颗粒子在由双芯光子晶体光纤形成的控制体内的散射光, 通过电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 识别各粒子的多普勒信号从而实现多点差分式速度测量。2004 年, 美国利弗莫尔实验室研发了一套可携带的四通道 PDV, 该设备可同时对 4 个点进行速度测量^[8]。在 2016 年, 李建中团队则研发出了一套可对 8 个测点进行同步测速的 8 通道 PDV 样机。杨军团队^[9]使用光纤密排阵列和双远心镜头研制了一种空间分辨 PDV 探头, 也可以实现同时测量 8 个点。

通常来说, 如果使用单点测速设备对多个点进行测速的话, 同时需要多台主机, 随着技术进步逐渐出现同时测试 4 个和 8 个点的设备, 但是测试点数需求始终在增加, 成本和设备复杂程度不断提升, 这就需要一种单套设备就能同时测多个点的装置。2018 年, 李建中团队^[10]继续突破, 研制出了小尺寸线阵光学探头, 该设备实现了测点分布 1×16 和 2×16 (可调), 可用于待测区域的密集阵列式诊断, 探索了在不增加常规单点光纤探针尺寸的前提下实现单探针多点测速的多芯光纤测速探头。牟瑞欣团队^[11]为实现多点测量, 使用光纤耦合的方法来增加测量通道数, 并实现远距离传输。

本设计为了实现单设备通过设置多根光纤对多个点进行测量的目的, 设计了一种像面直径达 10 mm 的双远心光学系统, 10 mm 的像面能够支持数十根甚至上百根光纤的排列, 从而实现多个点的测量。同时, 考虑到一些爆轰实验可能因为

触发方式或炸药量的不同而对探头造成损伤, 设计了工作物距 300 mm 的长距离系统, 以满足更苛刻的爆炸条件。此外, 光学系统中也避免了光线交叉的情况。

1 双远心光学系统原理

1.1 物方远心光路

物方远心光路的示意图如图 1 所示。该系统的孔径光阑放置于光学系统的像方焦平面上, 物方主光线平行于主光轴, 同时会聚中心位于物方无限远。这种镜头的特点是, 当物体在一定的工作范围内, 其放大倍率与物距无关。理论上, 当物距发生一定的改变, 像高不会发生改变, 即放大倍率不会变化。

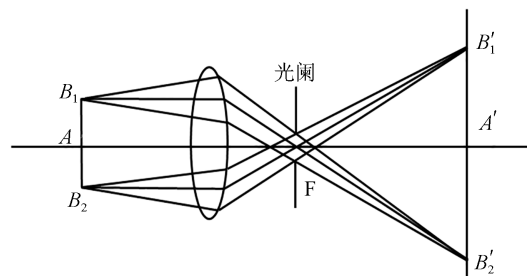


图 1 物方远心光路

Fig. 1 Optical paths of the object

1.2 像方远心光路

像方远心光路的示意图如图 2 所示。它是将孔径光阑放置在物方焦平面上, 同时像方主光线平行于主光轴, 且会聚中心位于像方无限远。这种镜头的特点是放大倍率与像距无关, 因此可以消除因为像方调焦不准而引入的测量误差。

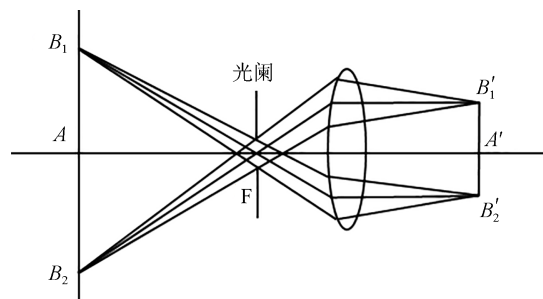


图 2 像方远心光路

Fig. 2 Optical paths of the image

1.3 双远心系统

双远心系统光路如图 3 所示, 其原理是: 将物方远心系统的像方焦平面与像方远心系统的物方

焦平面重合，从而使两种系统的优点相互结合，同时也能消除因为物方或者像方调焦不准确带来的误差。双远心系统的特点在于平行光入射且平行光出射。同时，在景深范围内可以认为，像高不随物距发生变化，不会像传统的工业相机出现非常明显的“近大远小”现象。因此，双远心系统的透视误差很小，这一点也可以通过远心度来确定。远心度是双远心系统的一个重要参数，在理想状态下，双远心系统的远心度应该为 0° ，但前提是孔径光阑应为无限小。而在实际情况中是不可能出现的，所以，远心度不可能为 0° 。一般情况下，双远心系统的远心度应小于 0.1° ，多数双远心系统会将远心度控制在 $(10^{-2})^{\circ}$ 量级。

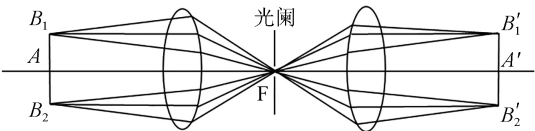


图 3 双远心光学系统光路示意
Fig. 3 Optical paths of the double telecentric optical system

2 双远心光学系统设计方法

2.1 设计要求及初始结构的确定

为了在光学系统像面处设置若干采样点，基本要求为：物方（被测物）大小为 5.6 mm，像方（光纤束状排列）大小为 10 mm，物方数值孔径为 0.025，波长为 1 550 nm。放大倍率计算公式为

$$\beta = y'/y \tag{1}$$

式中： y 为物方视场大小， y' 为像方视场大小。通过式（1）得系统放大倍率为 1.78。因此，本次设计的主要技术指标如表 1 所示。

选取合适的初始结构对于光学设计而言十分重要。目前确定初始结构的方式大致有 3 种：第 1 种是经典方式，即通过 PW 法进行设计，但是对于复杂系统而言，PW 法太过于繁琐，不易于确定初始结构；第 2 种是根据已有文献的结构设计初始结构，通过不同的优化方式得到最终结果；第 3 种则是可以通过 CodeV 或 Zemax 软件 2019 版本以后的版本中提供的初始结构或者从 Zemax 的例子库里找到自己所需要的初始结构。本文将 2 个经典双高斯系统（1896 年蔡司双高斯结构）进行合并，将前一组的像面与后一组的物面重合，并在重合处设置光阑。镜头初始结构设计如图 4 所示。

表 1 双远心光学系统主要技术指标

Tab. 1 Main technical indexes of the double telecentric optical system

指标	取值
放大倍率	1.780
物方数值孔径/mm	0.025
工作波长/nm	1 550
工作距离/mm	300
像方直径/mm	10
畸变/%	≤ 0.2
远心度/ $(^{\circ})$	≤ 0.1

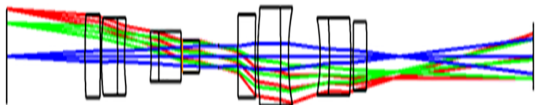


图 4 双远心光学系统初始结构和光路
Fig. 4 Initial structure and optical paths of the double telecentric optical system

2.2 优化过程及结果分析

在得到初始结构后，需要对系统进行多次优化，反复限制像差及其他参数数值，同时也要关注系统整体变化，以免出现透镜边缘过薄或过于锋利等脱离现实制造条件的情况出现。此外，也要选择合适的玻璃材料以满足成像的需求。具体优化过程如下。

首先，通过默认优化函数控制空气距离和玻璃厚度，避免出现镜片边缘过薄或边缘过于锋利而导致无法制作的问题，同时也可以防止镜面位置在优化过程中乱序。

像差方面，本文使用 LONA 和 TRAY 操作数控制纵向像差和垂轴像差，子午和弧矢场曲则通过 FCGT 和 FCGS 操作数控制，作为重要参数之一的畸变由 DISG 操作数控制。然后通过赛德尔图对各像差占比进行分析，最终优化至系统达到衍射极限。

由于双远心系统平行光入射平行光出射的特点，本文使用 RAID 和 RAED 操作数控制实际光线的入射角和实际光线的出射角，使他们尽可能为 0。同时，为了让像面直径达到 10 mm，使用 CENY 和 CENX 操作数分别控制像面最大视场所有光线的中心点 X 与 Y 的坐标。同时使用 TOTR 限制系统总长，用 RSRH 限制弥散斑。通过 RANG 可以得知在 0 视场、0.3 视场、0.7 视场和全

视场的远心度^[12-13]，工作物距由物面厚度数据直接设置。优化后的光路如图 5 所示。

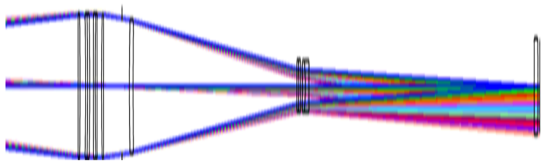


图 5 优化后的双远心光学系统的结构和光路
Fig. 5 Structure and optical paths of the improved double telecentric optical system

光学设计参数详见表 2。

优化结果畸变和场曲如图 6 所示。可以看出：在场曲方面，子午场曲得到良好矫正，弧矢场曲

相对较大，但仍小于 0.05 mm；畸变为 0.021%，小于设计要求的 0.2%。

各视场点列图如图 7 所示。可以看出，所有弥散斑半径都小于艾里斑半径，艾里斑半径为 68.58 μm，几何半径最大为 2.621 μm。其中，畸变程度在赛德尔数中为最大值。

调制传递函数（Modulation Transfer Function, MTF）如图 8 所示，其中：OTF 为光学传递函数（Optical Transfer Function）。可以看出，在奈奎斯特频率 11 lp/mm 处 MTF 值大于 0.2，曲线已经几乎和衍射极限重合。结合曲线以及点列图来看，该系统已经达到了衍射极限，且成像质量良好。

表 2 优化后双远心系统的光学参数

Tab. 2 Optical parameters of the improved double telecentric optical system

表面	曲率半径/mm	厚度/mm	折射率	阿贝数	玻璃
物面	无限	300.00	—	—	—
1	无限	1.00	1.801 1	34.974	N-LASF45
2	-163.41	1.58	—	—	—
3	-90.33	0.99	1.808 6	40.460	P-LASF50
4	-113.98	1.02	1.516 8	64.212	H-K9LGT
5	-122.70	1.00	—	—	—
6	-1 258.48	1.00	1.540 0	59.709	N-BAK2
7	82.71	1.00	1.744 0	44.850	N-LAF2
8	506.11	0.99	—	—	—
9	97.77	1.00	1.563 8	60.799	N-SK11
10	819.98	10.00	—	—	—
光阑	无限	4.00	—	—	—
12	74.23	2.00	1.612 7	58.634	N-SK4
13	116.23	88.74	—	—	—
14	-119.79	1.00	1.620 0	36.366	F2HT
15	-54.91	1.00	1.670 0	47.112	N-BAF10
16	247.75	1.01	—	—	—
17	-41.12	1.58	1.508 5	61.188	N-ZK7
18	-6.47	1.99	1.516 4	64.060	P-BK7
19	183.43	121.95	—	—	—
20	-425.95	2.21	1.608 6	46.597	N-BAF52
21	-76.41	5.00	—	—	—
像面	无限	—	—	—	—

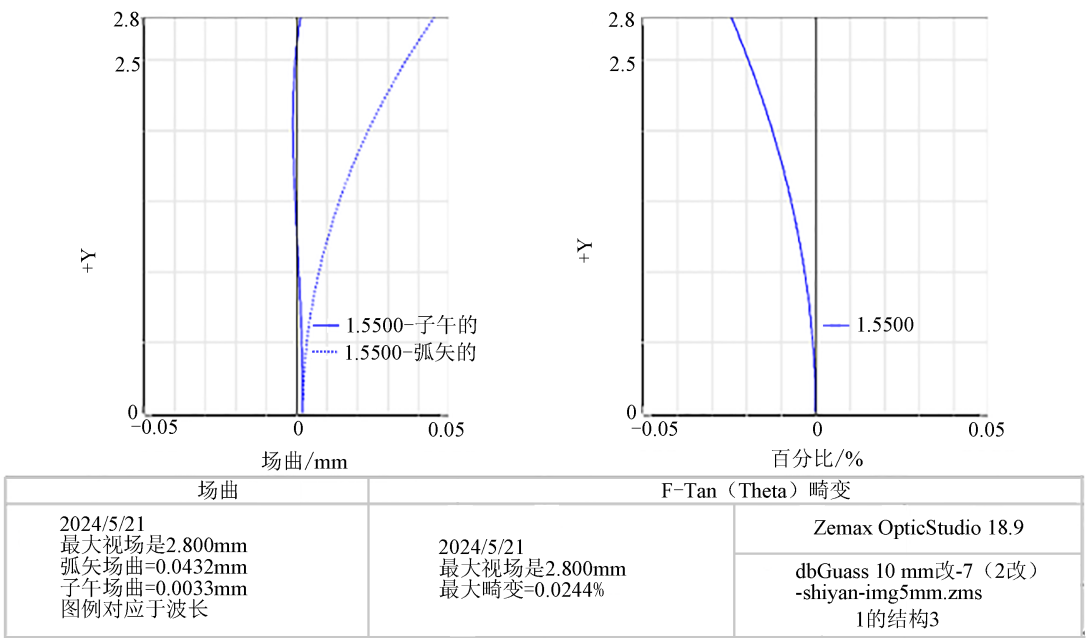


图 6 优化后双远心光学系统的场曲畸变曲线

Fig. 6 Field curvature distortion curves of the improved double telecentric optical system

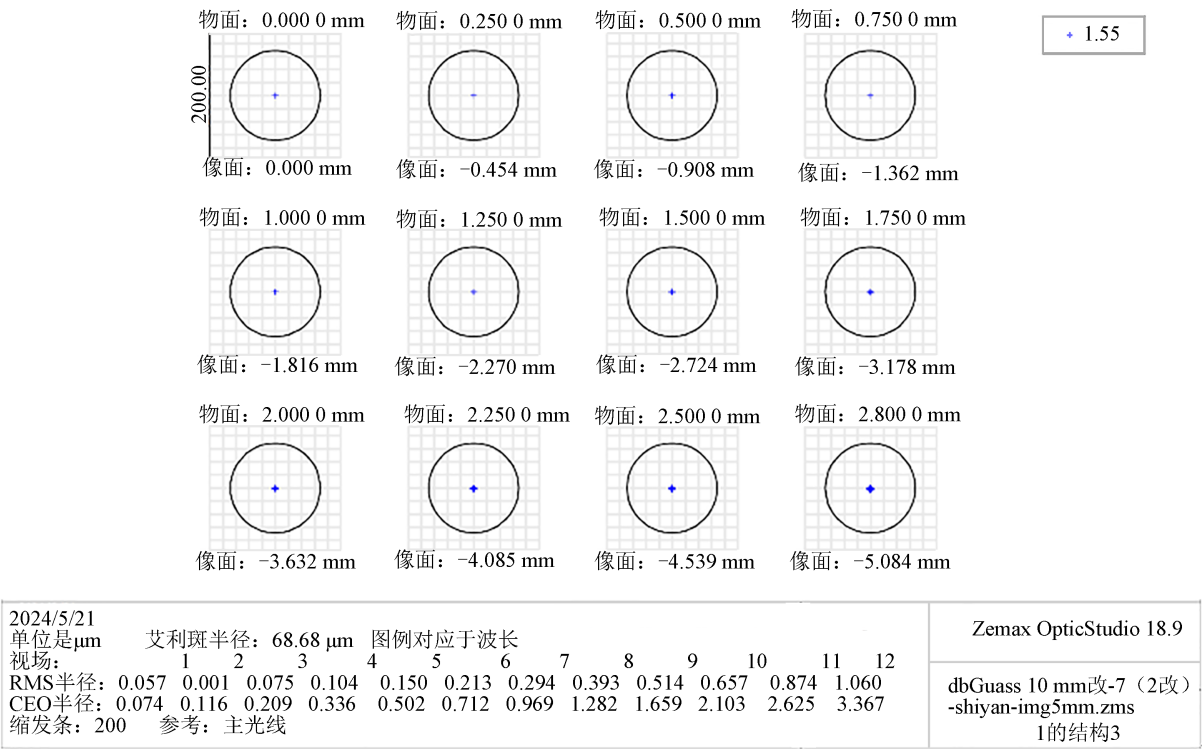


图 7 优化后双远心光学系统的点列图

Fig. 7 Spot diagram of the improved double telecentric optical system

由于被测物面在测试中可能会在光轴方向移动, 因此, 需要对离焦±5 mm处进行分析 (以光传播方向为正), 以免出现光纤串扰现象。如图9和图10所示, -5 mm表示测试面向靠近光学系统方向移动5 mm, +5 mm表示测试面向远离光学系

统方向移动5 mm。

在离焦-5 mm点列图 (图9) 中, 均方根 (RMS) 半径最大为174.022 μm, 最小为173.123 μm; 在离焦+5 mm点列图 (图10) 中, 均方根半径最大为172.363 μm, 最小为171.558 μm。以深

圳市飞宇光纤系统有限公司生产的 Fibers Array SM 64 ch 光纤阵列为例, 光纤间距是 $127\text{ }\mu\text{m}$, 像方各光斑间的距离为光纤间距乘以垂轴放大率, 因此, 像方的光斑间距应大于 $226\text{ }\mu\text{m}$ 。而离焦 $\pm 5\text{ mm}$ 处的光斑间距最小处大于 $447\text{ }\mu\text{m}$, 故不会产生光纤串扰, 可以满足多通道测速。

远心度是双远心系统中重要的指标之一, 通过 RANG 操作数可知, 在 $0H_y$ 、 $0.3H_y$ 、 $0.5H_y$ 、 0.7

H_y 、 $1H_y$ (H_y 为 y 方向归一化场坐标) 处的远心度, 分别为 0° 、 $0.002\text{ }597^\circ$ 、 $0.004\text{ }329^\circ$ 、 $0.006\text{ }061^\circ$ 、 $0.008\text{ }658^\circ$, 可以看出远心度均小于设计要求的 0.1° 。这样就可以使图像在景深范围内放大率不变, 有利于观察具有一定厚度或角度的目标, 而其值最高仅有 $0.008\text{ }658^\circ$, 可以更好地减小透视误差, 配合低畸变百分比。本设计得到的系统可以获得更加真实的图像。

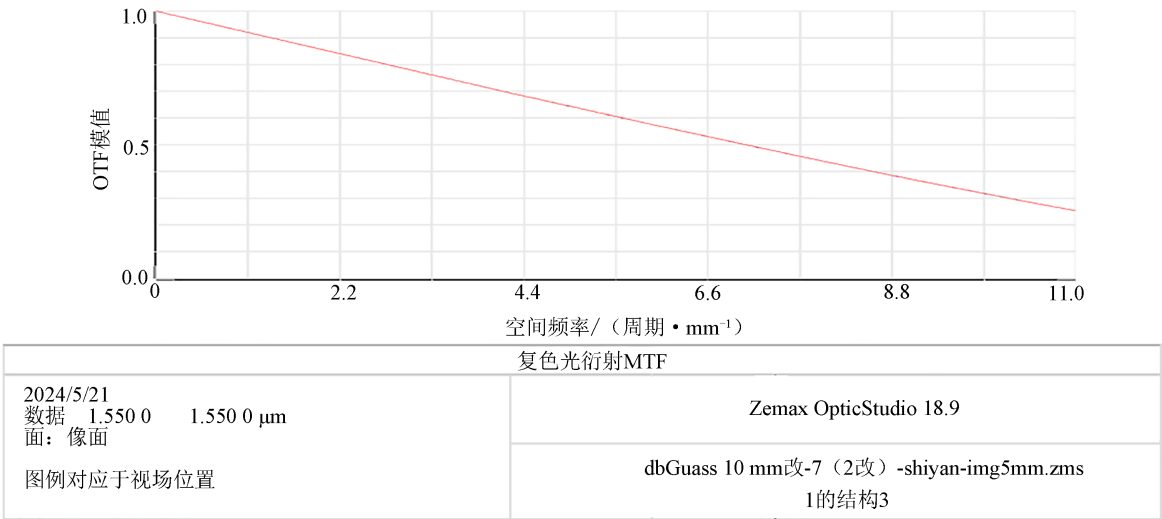


图 8 优化后双远心光学系统的调制传递函数 (MTF) 曲线

Fig. 8 Modulation transfer function curve of the improved double telecentric optical system

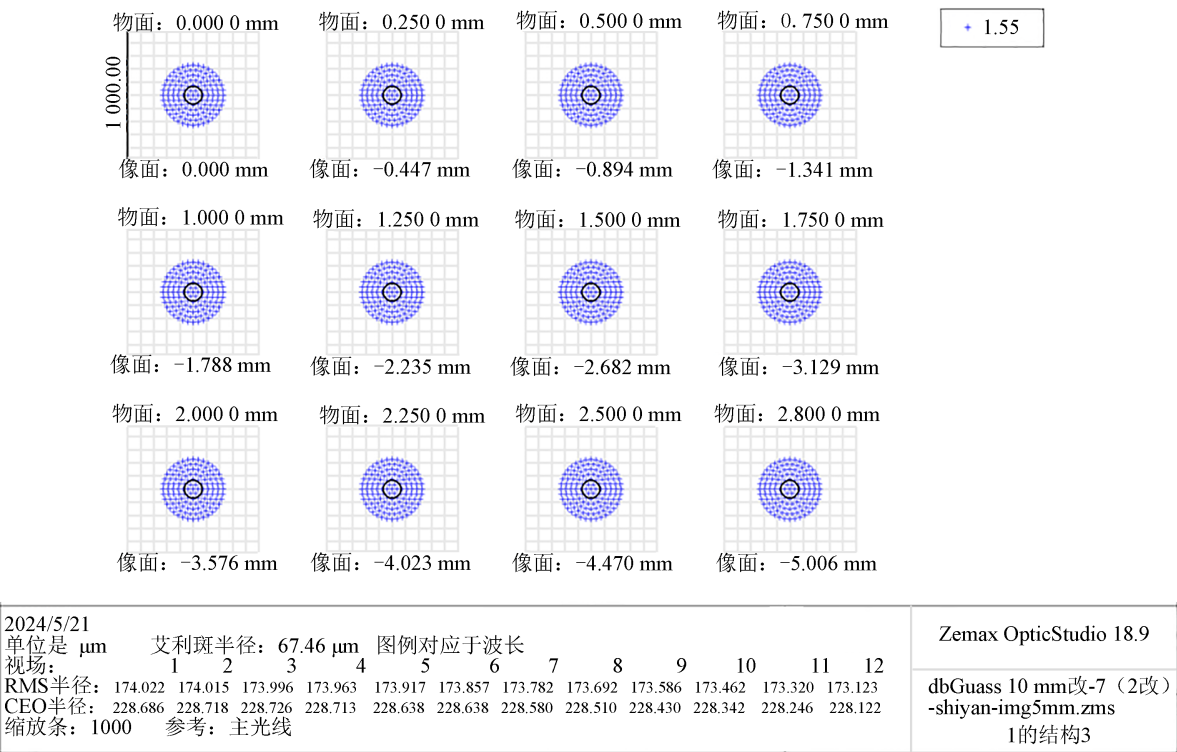


图 9 双远心光路离焦-5 mm 点列图

Fig. 9 Spot diagram of double telecentric optical paths with a -5 mm defocusing distance

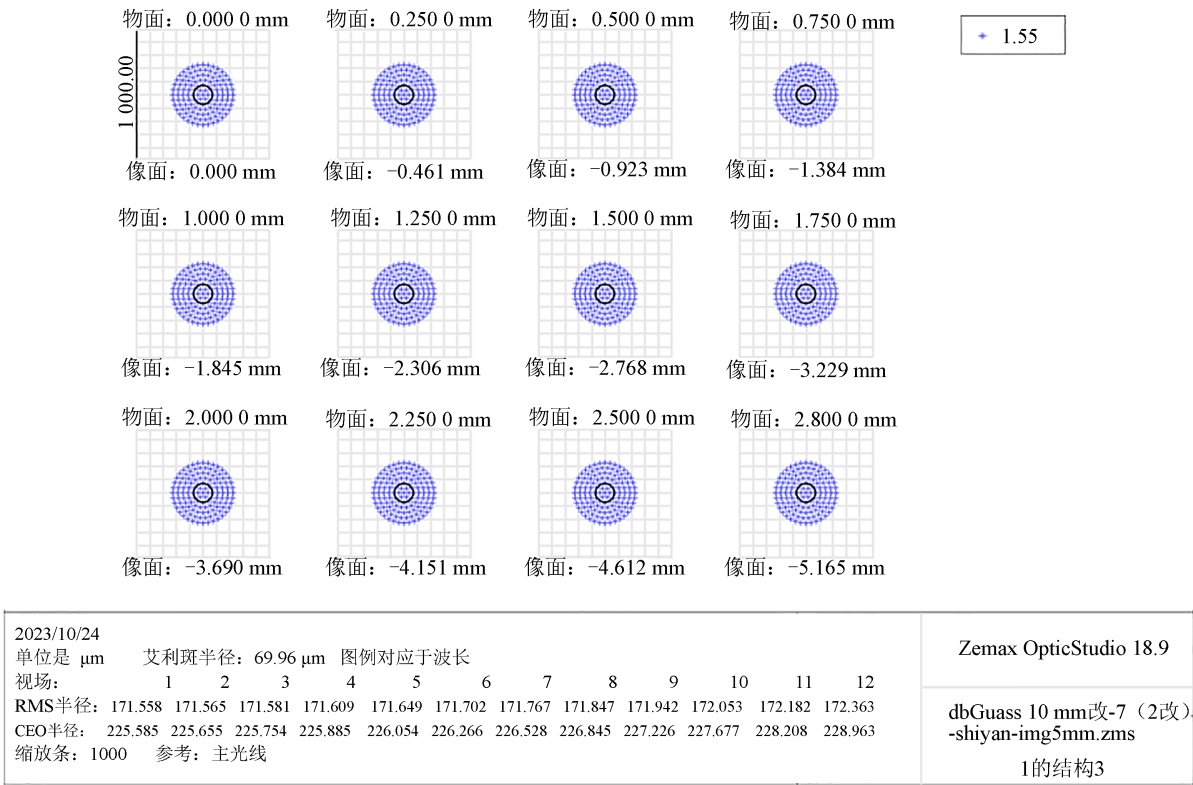


图 10 双远心光路离焦+5 mm 点列图

Fig. 10 Spot diagram of double telecentric optical paths with a +5 mm defocusing distance

4 结论

本设计根据多点光子多普勒测速的需要, 设计了像面直径达 10 mm 的系统, 为了满足各类爆炸冲击实验的需要, 将物距增加到 300 mm, 以免爆炸威力过大对光学系统造成损害。本系统一共使用 12 片球面透镜 (其中, 4 片单透镜, 4 片双胶合透镜), 所有玻璃材料不包含废弃状态材料。系统达到衍射极限, 全视场远心度均小于 0.01° , 最大畸变小于 0.03% , 所有像差均得到较好的校正, 实现了双远心系统的优点, 并达到了设计要求。长物距有利于适应在不同炸药威力下的测速, 而大像面则可以提供更多的采样点, 并且可以方便排布更多光纤。

参考文献:

[1] SHI X F, MA D J, DANG S L, et al. Reconstruction of ejecta field based on photon Doppler velocimetry from shock-loaded samples in vacuum [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2022, 282: 108106.

[2] MCDONALD J, PENA M, SATAPATHY S,

et al. Photon Doppler velocimetry measurements of impact-induced surface waves in glass and their role in fracture initiation and damage evolution[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 161: 104111.

[3] KWEEN I, DE WAELE W, FAES K. Photon Doppler velocimetry measurements of the impact velocity during electromagnetic pulse welding of copper-steel tubular joints[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2021, 62 (4): 237-262.

[4] ZHANG T, ZHAO J B, GAO Z P, et al. Shock initiation of the triaminotrinitrobenzene-based explosive JBO-9021 measured with a photon Doppler velocimeter[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(12): 1227-1235.

[5] 毕重连, 王健, 项红亮, 等. 基于裸光纤探头的双点光子多普勒测速系统[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 108-112.

BI C L, WANG J, XIANG H L, et al. Two-point photon Doppler velocimetry system based on bare fiber probe[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (8): 108-112.

[6] 李旭, 安丰江, 吴成, 等. 一种基于 PDV 的近场冲

- 击波高压测量技术[J]. 中国测试, 2018, 44(10): 134-138.
- LI X, AN F J, WU C, et al. A near-field shock wave measurement technique based on PDV[J]. China Measurement & Test, 2018, 44(10): 134-138.
- [7] 黄雪峰, 赵冠军, 李盛姬, 等. 基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒多点速度测量研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 132-140.
- HUANG X F, ZHAO G J, LI S J, et al. Study on multi-point velocity measurements of laser Doppler velocimetry based on dual-core photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 132-140.
- [8] 李建中, 王德田, 刘俊, 等. 多点光子多普勒测速仪及其在爆轰物理领域的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 223-228.
- LI J Z, WANG D T, LIU J, et al. Multichannel photonic Doppler velocimetry and its application in the field of explosion physics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 223-228.
- [9] 杨军, 闫亚东, 李奇, 等. 基于双远心镜头的空间分辨 PDV 探头研制[J]. 光子学报, 2021, 50(7): 147-159.
- YANG J, YAN Y D, LI Q, et al. Design of spatial resolution PDV probe based on double telecentric lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7): 147-159.
- [10] 李建中, 刘寿先, 刘俊, 等. 光子多普勒测速仪的单探头多目标测速能力研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 138-142.
- LI J Z, LIU S X, LIU J, et al. Measuring multiple targets velocities with just one probe of photonic Doppler velocimetry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 138-142.
- [11] 牟瑞欣, 张建, 安飞, 等. 多点光子多普勒测速光纤阵列耦合系统设计[J]. 光学技术, 2020, 46(4): 443-447.
- MU R X, ZHANG J, AN F, et al. Design of optical fiber array coupling system for multi-channel photonic Doppler velocimetry[J]. Optical Technique, 2020, 46(4): 443-447.
- [12] 杨康. 基于机器视觉的工业镜头的设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2013: 21-30.
- YANG K. Design of several industrial camera based on machine vision[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013: 21-30.
- [13] 曹一青. 一种用于机器视觉系统的双远心镜头设计[J]. 红外技术, 2022, 44(2): 140-144.
- CAO Y Q. Design of double telecentric lens using machine vision system[J]. Infrared Technology, 2022, 44(2): 140-144.