文章编号:1674-2869(2024)04-0431-08

激光多普勒测振仪中光学天线的优化设计与测试

郑帅君[1],谢 涛[1],马 赛[1],张余豪[1],张 聪[1],关向雨[2],袁晨智[1],金锐博*[1]
1. 光学信息与模式识别湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205;
2. 福州大学电气工程与自动化学院,福建 福州 350108

摘 要:传统的激光测振仪多使用氦氖激光器,不满足人眼安全条件,在户外容易受到太阳光干扰。其使用的光学天线大多数仅能工作于氦氖激光器的辐射波段,同时存在结构复杂、成本较高、收集效率低、工作距离较短等不足。为了解决以上问题,基于近红外波段透镜组的扩束和聚焦原理,以Zemax作为设计工具,以点列图和波前图为主要分析手段,设计并制作了一款可工作于1 550 nm的三片式收发一体光学天线,结构简单,成本低。分析结果显示:在0.3~15.0 m的工作距离范围内均可获得直径小于2 mm的聚焦光斑;测试结果显示其最大收集效率可达到51.6%。同时,将该光学天线应用于自主设计搭建的激光多普勒测振仪中,实现了不同工作距离下的振动测量,有效扩展了激光测振仪的应用范围和应用场景,在机械、航空、建筑、医学、农学等领域有很大的应用潜力。

关键词:扩束聚焦镜;Zemax;激光多普勒测振仪
中图分类号:O435 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202311013

Optimization design and testing of optical antennas for laser Doppler vibrometers

ZHENG Shuaijun[1], *XIE Tao*[1], *MA Sai*[1], *ZHANG Yuhao*[1], *ZHANG Cong*[1], *GUAN Xiangyu*[2], *YUAN Chenzhi*[1], *JIN Ruibo*[*1]
1. Hubei Key Laboratory of Optical Information and Pattern Recognition(Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

Abstract: Traditional laser vibrometers often use helium-neon lasers, which do not meet the safety requirements of the human eye and are susceptible to interference from sunlight. The optical antennas used in these systems mostly operate within the radiation band of helium-neon lasers. However, they suffer from drawbacks such as complex structure, high cost, low collection efficiency, and short working distance. In order to address these issues, a three-piece integrated optical antenna working at 1 550 nm was designed and produced based on the beam expanding and focusing principles of the near-infrared wavelength range, with Zemax serving as the design tool and spot diagrams and wavefront maps as primary analysis methods, showing a simple structure and cost-effectiveness. The analysis results show that focused light spots with a diameter less than 2 mm can be obtained within a working distance range of 0.3-15.0 m; the test results indicate a maximum collection efficiency of 51.6%. Integrating this optical antenna into a self-designed laser Doppler vibrometer enabled vibration measurements at different working distances, effectively expanding the

收稿日期:2023-11-23
基金项目:国家自然科学基金(92365106,12074299)
作者简介:郑帅君,硕士研究生。Email:zsj0608@foxmai.com
***通信作者**:金锐博,博士,教授。Email:jin@wit.edu.cn
引文格式:郑帅君,谢涛,马赛,等.激光多普勒测振仪中光学天线的优化设计与测试[J].武汉工程大学学报,2024,46(4):431-438.

application range and scenarios of laser vibrometers. This innovation has significant potential applications in fields such as mechanical engineering, aviation, architecture, medicine, and agriculture.

Keywords: beam expanding focusing mirror; Zemax; laser Doppler vibrometer

激光多普勒测振仪(laser Doppler vibrometer, LDV)以其高精度、高效率和易于携带等特点,逐渐成为应用广泛的非接触式振动测量设备,适用于多个领域[1-3]。在医学领域内,非接触式测量心脏的跳动等,以确定人体是否患有疾病[4-5];在农学领域内,检测瓜果的振动频率,以确定其成熟度[6-7];在建造领域内,测量混凝土的共振频率,以确定建筑物是否存在安全隐患[8-9];在航天领域内,测量航天器件组件的共振频率,以避免因裂痕等质量问题造成的安全风险[10-11]。在LDV的发展过程中,激光光路结构的设计[12]和振动信号的解调[13]是两个重要的关注点。光学天线是激光光路结构中的重要部件。光学天线又称扩束聚焦镜,是传输和接收光学信号的装置,其相关参数决定激光测振仪的最终测量效果。

目前的光学天线普遍存在以下问题:(1)LDV使用的激光源大多数是氦氖(He-Ne)激光器,因此其使用的光学天线的工作波长也位于632.8 nm附近[14]。但是,氦氖激光器具有难以小型化集成的缺点,而且其激射波段也存在不满足人眼安全条件、在户外容易受到太阳光干扰等缺点。(2)市场上的扩束聚焦镜头内部结构相对复杂,镜片数量较多,例如,在文献[15]中达到7片,这种复杂的结构无疑增加了制造成本。(3)常用的LDV工作距离通常在5 m以内[17],难以满足激光振动测量远距离变焦的要求。限制工作距离增加的重要原因是光学天线的变焦能力。因此,开发和设计工作于新波段、结构简易、变焦能力强的光学天线成为LDV研究中亟待解决的问题。

基于Zemax软件,设计了一种适用于1 550 nm波长激光测振仪的三片式扩束聚焦镜头,其工作距离可达到15 m。1 550 nm波段具有人眼安全以及避免太阳光干扰的优势,且1 550 nm波段的光通信波段激光技术已发展成熟,容易集成。通过实际测试,设计的镜头在0.3~15.0 m的距离内聚焦光斑的直径可以达到2 mm以下,有效扩展了激光测振仪的应用范围和应用场景。

1 面向LDV的光学天线设计原理与设计目标

1.1 激光多普勒测振原理

多普勒效应由奥地利物理学家多普勒于1842年首次提出,其描述了由于波源或观测者的运动而出现观测频率与波源频率不同的现象。其物理解释可以简要概括为波源发出的波传输至与之发生相对位移的运动物体上,物体反射的波被探测器接收后,接收的波的频率会随之发生变化。频率变化的具体规律为:若运动物体靠近波源、远离波源和保持相对静止时,接收到的波的频率分别表现为升高、降低和保持不变,而在LDV中,正是利用物体的运动改变光的频率的原理[1]实现激光测振。

反射光的多普勒频移量表示为[1]:

$$\Delta f_{\mathrm{d}} = \frac{2v}{\lambda} \tag{1}$$

其中v为运动物体的速度,λ为所用激光的波长。

假设待测物体做简谐振动,则其位移表示为:

$$X(t) = A\sin(2\pi ft) \tag{2}$$

其中A为物体振动的振幅,f为物体的振动频率。

将振动平衡点定义为简谐振动的位移原点,对式(2)求一阶导数,可得到振动物体的速度$v(t)$为:

$$v(t) = 2\pi f \times A\cos(2\pi ft) \tag{3}$$

以式(3)中的$v(t)$代换式(1)中的v,可得到:

$$\Delta f_{\mathrm{d}} = \frac{4\pi fA}{\lambda}\cos(2\pi ft) \tag{4}$$

由式(4)可知,对于简谐振动物体,其在激光测振过程中的多普勒频移量的时域演化呈现出简谐振动的规律,且振动频率与物体振动频率相同。只要解调出多普勒频移量的振动频率,就可以根据式(4)得到f和A,根据式(2)~式(3)得到物体的速度和位移。进一步,根据加速度为位移的二阶导数得到物体的加速度为:

$$a(t) = -(2\pi f)^2 \times A\sin(2\pi ft) \tag{5}$$

通过上述过程解调出多普勒频移量的振动频率。在解调过程中,需要反射回来的光的信噪比足够强。为满足这一条件,需要对光学天线的激光收发过程特性进行优化设计。

1.2 高斯光束与光学天线的设计目标

LDV的工作原理如图1所示。图1中,激光源发出的光经光学天线扩束聚焦后,照射至待测物体上发生反射,反射光被光学天线接收后输入探测器,并对探测器输出的电信号进行解调。为了测量不同距离下振动物体表面反射光的Δf_{d},需要

使用光学天线进行变焦和收集反射光。光学天线的收集效率直接影响LDV的测试结果，这是因为LDV的测量灵敏度与收集到的光子数量紧密相关，而收集效率与光斑直径的大小密切相关。聚焦光斑直径越小，LDV信号强度越强，接收到的信息越多[18]。

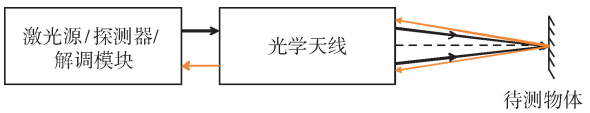

图1　LDV的工作原理示意图

Fig. 1　LDV working principle

激光扩束聚焦镜将光聚焦在待测物体表面，在物体表面形成的光斑会随着距离的增加而增大。考虑到激光的高斯特性，近轴高斯光束束腰的定义为：

$$\omega_0 = \frac{2\lambda}{\pi\theta} \tag{6}$$

其中ω_0为激光器出射端的束腰半径，θ为发散角。

光斑半径ω与传播距离x的关系如式(7)所示：

$$\omega^2 = \omega_0^2\left[1+\left(\frac{\lambda x}{\pi\omega_0^2}\right)^2\right] \tag{7}$$

光电探测器的尺寸和光斑半径与最终接收到的信号强度I有如下关系[19-20]：

$$I = \frac{akq}{2}\frac{d}{\omega}\sqrt{\frac{\pi}{2}} \tag{8}$$

式(8)中：q为与出射面相对平行的观察面的平均光强，d为探测器光敏面的直径，a为与参考光光强相关的常数，k为比例常数。

由式(8)可知，探测器接收到的I与d成正比，与ω成反比。为了满足激光测振仪的镜头要求，实现远距离成像，设计了一种扩束聚焦镜头。该镜头要求在0.3~15.0 m的范围内，光斑直径小于2 mm，波长为1 550 nm。

2　光学天线设计

2.1　结构设计

光学天线结构设计就是透镜组的设计。本文使用Zemax软件进行透镜设计，光源波长设定为1 550 nm。实际应用中，大多数1 550 nm激光器的光从SMF28e光纤输出。SMF28e光纤的数值孔径(numerical aperture，NA)为0.14，纤芯直径为8.2 μm。据此，Zemax光圈设置为物方数值孔径NA，其值为0.14。通过对双组分(两片式)[21]、三组分(三片式)[22]和四组分(四片式)[23]变焦透镜的分析和比较，并参考软件附带的类似初始结构以及文献[15-17]中的初始结构，将透镜组的初始结构选择为三组分变焦距透镜结构，Zemax模型如图2所示。其中，L1、L3分别是焦距为11 mm、125 mm的平凸透镜，L2是焦距为−40 mm的平凹透镜。对于不同的工作距离，各个透镜的位置不同，优化后光学天线的出射光束性能也不同。

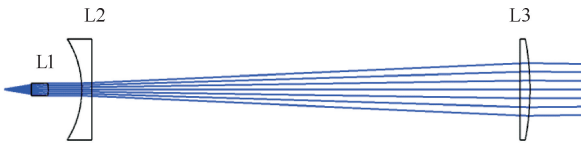

图2　Zemax模型图

Fig. 2　Zemax model

在初始结构基础上，将透镜曲率、透镜半径、透镜厚度、透镜材料和透镜位置设置为变量，使用Zemax自带的优化函数[24-25]对透镜组进行优化，以实现设计目标。优化后的光学天线各透镜参数如表1所示，其中，OBJ表示物面，IMA表示像面，表面2和3分别表示透镜L1的前表面和后表面，表面4和5分别表示透镜L2的前表面和后表面，表面6和7分别表示透镜L3的前表面和后表面，D-ZK3M和N-BK7为硼硅酸盐冕牌玻璃，SILICA为熔融石英。

表1　优化后的光学天线各透镜参数

Tab. 1　Parameters of optimized optical antenna lens

表面	曲率半径 / mm	厚度 / mm	玻璃	净口径 / mm
OBJ	无限	8.113		
2	无限	5.032	D-ZK3M	2.036
3	−6.428	−		2.750
4	−20.670	3.000	N-BK7	12.700
5	无限	−		12.700
6	无限	3.000	SILICA	12.700
7	−57.308	−		12.700
IMA	无限	−		

2.2　聚焦光斑的点列图分析

使用Zemax软件的点列图绘制功能确定透镜组在工作距离处的成像光斑大小，将成像光斑与同距离下的艾里斑进行对比，判断其是否满足成像光斑直径小于艾里斑直径的条件。图3为图2所示的透镜组在工作距离分别为0.3、0.5、10.0和15.0 m时，经过Zemax软件自动优化后的点列图，其中散点图为点列图，实线圆为艾里斑。

由图3可知，工作距离为0.3、0.5、10.0和15.0 m时，优化后透镜组的成像光斑均方根(root mean

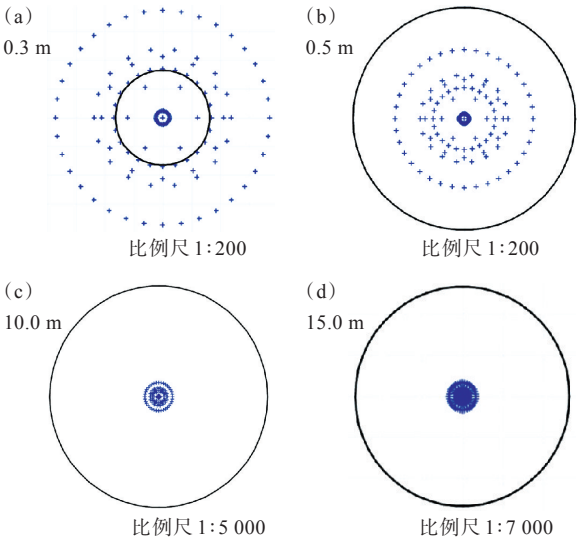

图3 优化后的光学天线在不同工作距离处的点列图

Fig. 3 Spot diagram of optimized optical antennas at different working distances

square，RMS）半径分别为48.192、28.330、147.580和216.170 μm。艾里斑半径分别为32.93、70.85、1 807.00和2 667.00 μm。优化后透镜组的成像光斑直径均小于2 mm。工作距离为0.5、10.0和15.0 m时，成像光斑均小于艾里斑。当工作距离为0.3 m时，成像光斑半径大于艾里斑半径，但其光斑直径也在2 mm以下，能够达到设计要求。

2.3 聚焦光斑的波前分析

波像差是评价成像质量的重要指标，使用光学软件对光学天线在不同距离下的成像结果进行模拟，得到光学天线在不同距离处的波像差图，如图4所示。

波像差的RMS可以由式(9)计算得到：

$$M_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}W_i^2}{n}} \tag{9}$$

其中W_i表示波像差图中第i个像素点的像差大小，n表示任意常数。

图4(a-d)表示不同工作距离处波像差W的RMS分别为202.585 nm（0.130 7λ）、54.560 nm（0.035 2λ）、10.695 nm（0.006 9λ）和10.385 nm（0.006 7λ），均小于0.25λ，达到衍射极限，满足设计要求。

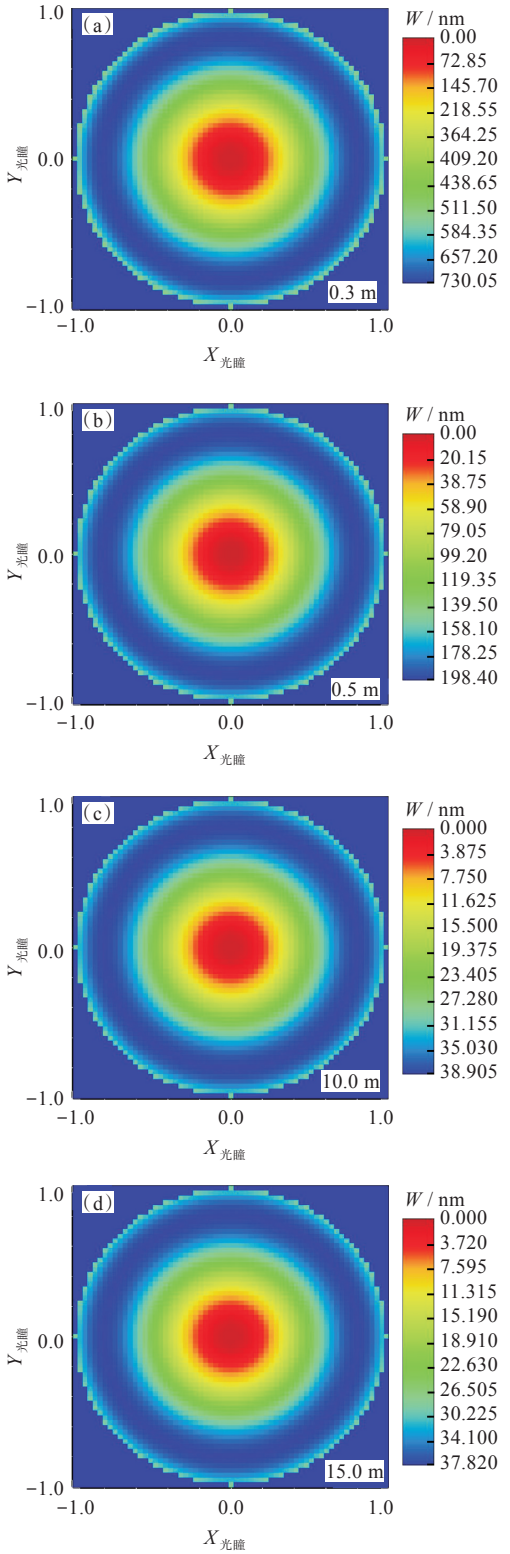

图4 不同工作距离处的波像差图

Fig. 4 Wavefront aberration maps at different working distances

3 光学天线测试

3.1 光学天线的组装

光学天线的结构如图5所示，透镜组包含3片透镜，均为Thorlabs的商业透镜，透镜焦距从左到右依次为：11、−40和125 mm。透镜安装在直径为25.4 mm的套筒中，透镜之间使用间隔环进行隔离，通过2个间隔环将透镜固定在筒内，保证不同透镜之间间隔大小的稳定性。在变焦过程中，保持L1与L2之间的距离不变，通过手动旋转L3改变L2与L3之间的距离，实现在不同工作距离下的聚焦。

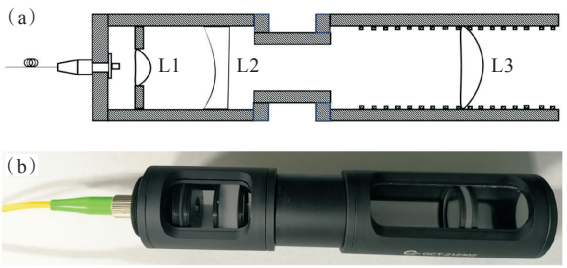

图5　光学天线结构示意图(a)和实物图(b)

Fig. 5　Schematic diagram of optical antenna structure (a) and physical image (b)

3.2　光学天线聚焦光斑的测试

制作完成光学天线之后，对其在不同工作距离下的聚焦光斑大小进行测试。测试方法为刀片法[26-27]，假设光束为高斯光束的条件下对光束束腰进行测量。实验光路如图6所示。

图6中，通过调焦使光学天线出射的光束在刀片所在平面上聚焦，利用电控位移台控制刀片移动，挡住光束中一部分光，同时利用光功率计接收未被刀片挡住的透射光并记录其功率。通过记录刀片在不同位移量情况下的透射光功率变化，并利用包含误差函数的标准化转换方法[28]，将总功率的变化转化为光斑大小变化，进而推算出光斑直径。实验测量结果如表2所示。

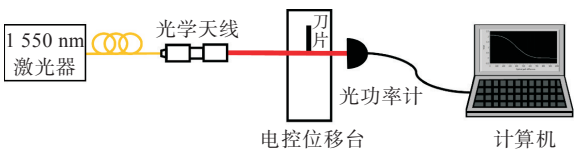

图6　刀片法测束腰光路图

Fig. 6　Experimental setup for measuring waist light path with the blade method

表2　光斑直径对比表

Tab. 2　Comparison of spot diameters

工作距离 / m	光斑直径 / mm	
	模拟值	实际值
0.3	0.096	0.423±0.008
0.5	0.056	0.254±0.004
5.0	0.158	0.520±0.005
10.0	0.294	0.789±0.012
15.0	0.532	1.252±0.061

由表2可知，聚焦光斑直径随着工作距离的增加不断增大，变化趋势与图3一致。在工作距离为0.5 m时，聚焦光斑最小能够达到0.254 mm。在实际测量中，通过肉眼观察光学天线在工作距离处是否达到最优聚焦效果存在一定误差，导致聚焦光斑直径的测量值与模拟值差别较大，但实际测量的光斑直径小于2 mm，能够达到设计目标。

3.3　光学天线的耦合效率测试

光学天线的耦合效率也是影响LDV性能的重要参数。由于接收光束与天线夹角不同时，天线对反射光的收集效率也不同，而耦合效率不仅与天线固有的收发性能有关，也与收集效率有关。为此，在测量耦合效率前，利用仿真方法对光学天线的收集效率随着接收光束与天线之间夹角的变化进行研究，以在耦合效率测量中设置最优夹角。

在仿真中，对收集效率使用TracePro软件进行模拟测试，模型选用近6.0 μm粗糙度的铝材质管道，材料表面对1 550 nm光的吸收率设置为0.059 6，反射率设置为0.65，以双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function，BRDF)系数表示材料的散射系数，经过TracePro软件计算，BRDF系数设置为0.290 4。对经管道漫反射后镜头的收集效率进行计算，模拟效果如图7所示，收集效率如表3所示。结果显示，在正入射时，镜头的收集效率最高，为40.36%。越靠近管道切线方向，镜头的收集效率越小，最终至0.1%以下。

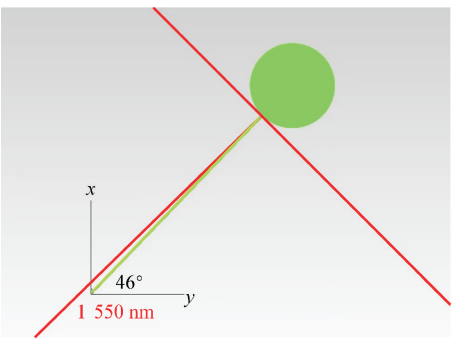

图7　管道正入射模拟图

Fig. 7　Simulation diagram of pipeline normal incidence

表3　不同倾斜角下光学天线的收集效率

Tab. 3　Collection efficiency of optical antennas at different tilt angles

光学天线倾斜角 / (°)	接收光功率 / mW	效率 / %
40.0	0.042	0.08
44.0	0.084	0.16
45.5	0.127	0.25
45.6	5.800	11.60
46.0	20.180	40.36
46.4	5.800	11.60
46.5	0.127	0.25
48.0	0.084	0.16
52.0	0.042	0.08

根据收集效率的测试结果，选择光学天线相

对振动物体正入射的角度进行耦合效率的测试。测试实验系统如图8所示，1 550 nm激光器发出的光经由光学天线发射后聚焦在振动物体上，物体表面对激光反射形成反射光，经光学天线接收后从光纤环形器的3端口出射。实验中，在不同工作距离下，利用光功率计在光学天线出射口处对发射功率进行测量，在光纤环形器3端口处对反射光功率进行测试，将光纤环形器3端口处的功率与光学天线出射口的功率相除，得到光学天线的耦合效率。测试结果如表4所示。

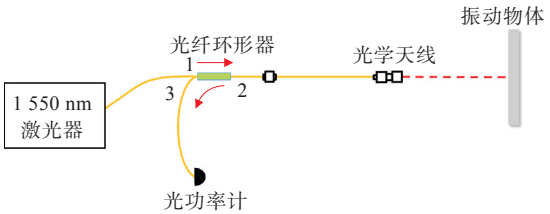

图8 聚焦光斑测试装置

Fig. 8 Testing setup for focusing spot

考虑到图8中所示法兰的插入损耗为0.2 dB，光纤环形器的插入损耗为1.0 dB，需要对表4中直接计算出的耦合效率进行修正，获得修正后的耦合效率。由表4可知，光学天线在2.0 m处耦合效率最高，能够达到51.6%。随着工作距离的不断增加，耦合效率越来越低。出现这种变化趋势的原因为工作距离的增加使反射光的光斑变大，当光斑过大时，仅有一部分光能够被接收进入光学天线中，从而导致耦合效率降低。

表4 耦合效率测试实验结果

Tab. 4 Experimental results of coupling efficiency test

工作距离 / m	光学天线出射端光功率 / mW	光线环行器3端口光功率 / mW	耦合效率 / %	修正后的耦合效率 / %
0.3	20	0.110	0.550	0.730
0.5	20	0.330	1.650	2.190
2.0	20	7.800	39.000	51.600
5.0	20	7.300	36.500	48.290
10.0	20	0.001	0.006	0.008

3.4 激光测振仪测试光路的搭建以及性能测试

在设计、组装并对光学天线的耦合效率进行测试的基础上，进一步将光学天线应用于LDV中。LDV实验光路如图9所示。1 550 nm激光器发出的激光经过光纤分束器(10∶90)分为两路，其中90%的光经过1端口进入光纤环形器，并从2端口输出后通过光学天线发射进入自由空间。振动物体为带有反射片的喇叭，通过信号发生器产生频率可变的正弦信号驱动喇叭产生振动。振动物体表面的反射激光后向传输，被光学天线接收后，从光纤环形器3端口输出并进入光纤耦合器的输入端。从光纤分束器10%的端口中输出的激光经过调制频率为80 MHz的声光调制器(acousto-optic modulator，AOM)产生Bragg衍射，得到频率为调制频率与物体振动频率之和的拍频信号，AOM的驱动器接入24 V的电压。两路光经过光纤耦合器进入平衡探测器中，将接收到的光信号转换为电信号，被探测器所接收。经过解调模块进行振动信号的正交解调，通过示波器显示接收到的波形。为了降低外界环境信号的干扰，增加50 Hz的滤波器。最终搭建完成的激光测振仪外观和内部结构分别如图10(a)和图10(b)所示。

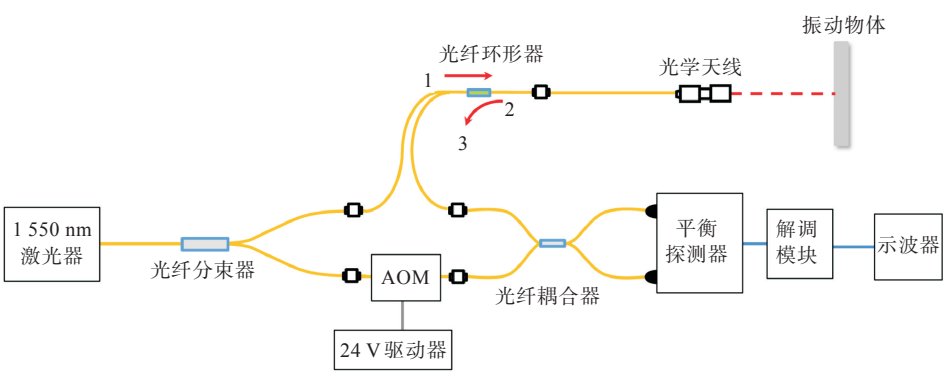

图9 LDV实验光路图

Fig. 9 Experimental optical path of LDV

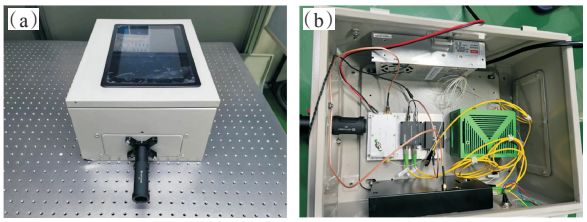

图10　激光测振仪外观(a)和内部结构(b)

Fig. 10　External view (a) and internal structure (b) of the laser vibrometer

实验测试了不同工作距离下激光测振仪对不同频率的物体振动的响应，对不同工作距离下得到的信号进行解调。图11展示了振动频率分别为0.05、0.10、1.00、5.00、10.00、20.00 kHz时激光测振仪得到的解调信号时域波形图。从图11中可以看到，使用自主设计的光学天线搭建的激光测振仪在0.05~20.00 kHz频率范围内均可以实现振动的灵敏检测。

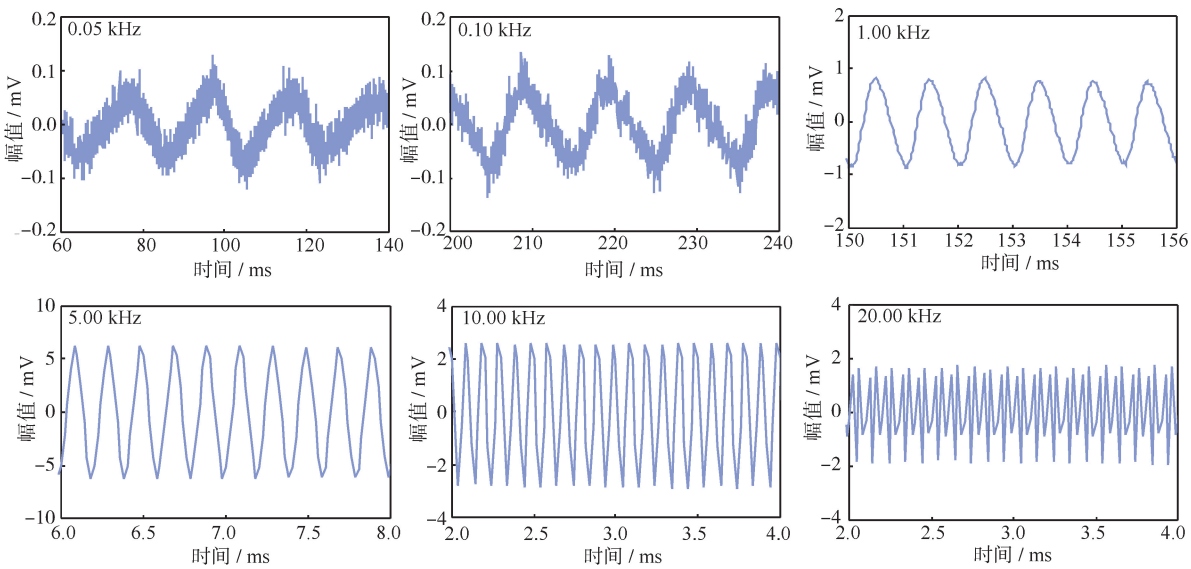

图11　不同振动频率的解调信号时域波形图

Fig. 11　Time-domain waveforms of demodulation signals at different vibration frequencies

4　结　论

本文设计的三片式收发一体光学天线具有结构简单、制作成本低的优势，其工作于1 550 nm波段，该波段有成熟的可集成激光器可用且具有对人眼安全和可避免太阳辐射噪声影响的优点。光学天线在0.3~15.0 m工作距离范围内，均可获得直径小于2 mm的光斑，对振动物体表面反射光的最大收集效率能够达到51.6%。将其应用于自主开发的LDV上，可以避免强光的干扰，能够在0.05~20.00 kHz的频率范围实现信号解调。与传统的LDV相比，对外界干扰抵抗能力更强，响应速度更灵敏，实现更低频率的信号解调。该光学天线也能够针对其他不同应用场景进行定制化设计，通过新的加工技术，减小光学系统整体结构尺寸改进光学结构，实现更远距离的光学聚焦，进一步实现深空探测。该多普勒测振仪还可以在低成本、小型化、便携式、交互界面等方面做进一步的改进，从而使其能够广泛应用于机械、航空、建筑、医学、农学等相关领域的振动测量。

参考文献

[1] 张驰，王顺，关向雨，等. 激光多普勒测振技术应用的新进展[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(19)：1900006.

[2] ZHANG C，YANG Z X，WANG S，et al. Comparison study of laser vibration measurement and quantum vibration measurement [C]//2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway，NJ：IEEE，2021：1-4.

[3] DI MAIO D，CASTELLINI P，MARTARELLI M，et al. Continuous scanning laser vibrometry：a raison detre and applications to vibration measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2021，156：107573.

[4] MANCINI V，TOMMASIN D，LI Y L，et al. Detecting carotid stenosis from skin vibrations using laser Doppler vibrometry-an in vitro proof-of-concept [J]. Plos One，2019，14(6)：e0218317.

[5] PENG S P，WU S S，LI Y Y，et al. All-fiber monostatic pulsed laser Doppler vibrometer：a digital signal processing method to eliminate cochannel interference

[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 124: 105952.

[6] LANDAHL S, TERRY L A. Non-destructive discrimination of avocado fruit ripeness using laser Doppler vibrometry [J]. Biosystems Engineering, 2020, 194: 251-260.

[7] ZHEN O P, HASHIM N, MARINGGAL B. Quality evaluation of mango using non-destructive approaches: a review [J]. Journal of Agricultural and Food Engineering, 2020, 1(1): 0003.

[8] SUGIMOTO T, SUGIMOTO K, KOSUGE N, et al. High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56 (7S1): 07JC10.

[9] KLUN M, ZUPAN D, LOPATIČ J, et al. On the application of laser vibrometry to perform structural health monitoring in non-stationary conditions of a hydropower dam[J]. Sensors, 2019, 19(17): 3811.

[10] WANG Q, ZHU J, DAI J B, et al. Research on blade modal testing method based on 3D scanning laser Doppler vibration measurement technology [C]// 2020 2nd International Conference on Electronic Science and Automation Control (ESAC 2020). Ottawa: CSP, 2020: 55-65.

[11] PIECZONKA Ł, AMBROZIŃSKI Ł, STASZEWSKI W J, et al. Damage detection in composite panels based on mode-converted lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 99: 80-87.

[12] FU H J, XINKANG X, WANG Z, et al. Homodyne laser vibrometer modified by an LCVR for measurement at the nanometer level [J]. Applied Optics, 2022, 61(3): 775-782.

[13] 宋聪, 黎杨. 调频广播外辐射源雷达中的目标方向估计方法[J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43(3): 338-343.

[14] CASTELLINI P, MARTARELLI M, TOMASINI E P. Laser Doppler vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20 (6): 1265-1285.

[15] 张燕. 一种大变倍比紧凑型红外变焦镜头: 202122653698.5 [P]. 2022-04-15.

[16] 白兴安, 陈汇东. 变焦镜头: 202123099026.0 [P]. 2022-04-19.

[17] 武俊峰, 舒风风, 吴一辉. 用于激光测振的可调扩束聚焦镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061409.

[18] XI C B, ZHOU J, NIE X M, et al. A novel laser Doppler velocimeter based on a liquid lens [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1635: 012083.

[19] 黄华, 周健. 激光多普勒测速仪中散射光特性的研究 [J]. 应用光学, 2010, 31(1): 151-155.

[20] 席崇宾, 黄荣, 周健, 等. 基于液体透镜的激光多普勒信号品质因子增强技术[J]. 中国激光, 2021, 48 (7): 0704003.

[21] MIKS A, NOVAK J. Analysis of two-element zoom systems based on variable power lenses [J]. Optics Express, 2010, 18(7): 6797-6810.

[22] MIKS A, NOVAK J. Analysis of three-element zoom lens based on refractive variable-focus lenses [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 23989-23996.

[23] HAO Q, CHENG X M, DU K. Four-group stabilized zoom lens design of two focal-length-variable elements [J]. Optics Express, 2013, 21 (6): 7758-7767.

[24] 张浩, 樊红英, 赵琦, 等. 基于非球面镜组的大口径激光匀化技术研究[J]. 激光技术, 2023, 47(3): 340-344.

[25] 黄珊, 邓磊敏, 杨焕, 等. 基于ZEMAX的半导体激光器匀光设计[J]. 激光技术, 2014, 38(4): 522-526.

[26] 马靖博, 李鹏, 周子恒, 等. 刀口法测量拉盖尔-高斯涡旋光斑的理论与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1912004.

[27] 杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿, 等. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 829-832.

[28] GONZÁLEZ-CARDEL M, ARGUIJO P, DÍAZ-URIBE R. Gaussian beam radius measurement with a knife-edge: a polynomial approximation to the inverse error function [J]. Applied Optics, 2013, 52 (16): 3849-3855.

本文编辑: 霍淑利