

用于激光测振的可调扩束聚焦镜设计

武俊峰, 舒风风, 吴一辉

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 采用 ZEMAX 对单点激光测振仪中的扩束聚焦镜进行了分析设计。首先对高斯氦氖激光光源进行了模拟, 然后计算了系统的初始结构。分析了前透镜移动距离与激光聚焦距离的关系, 获得了不同聚焦距离下的光斑尺寸。最后设计了可调扩束聚焦系统的机械结构。该结构具有调节平滑, 前透镜不旋转的特点, 减小了由旋转透镜带来的误差。

关键词 激光器; 激光光学; 扩束聚焦镜; 高斯光束

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061409

Design of Adjustable Beam Expanding Focusing Lens for Laser Vibration

Wu Junfeng, Shu Fengfeng, Wu Yihui

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract A beam expanding focusing lens of single scanning laser vibrometer is analyzed and designed by ZEMAX. Firstly, the Gauss He-Ne laser source is simulated, and then the initial structure of the system is calculated. The relationship between the moving distance of the front lens and the laser focusing distance is analyzed, and the spot sizes at different focusing distances are obtained. Finally, the mechanical structure of the adjustable focusing system is designed. The adjustment of the structure is smooth, and the front lens can not rotate. Thereby the errors caused by rotating lens are reduced.

Key words lasers; laser optics; beam expanding focusing lens; Gauss beam

OCIS codes 140.3295; 140.3300; 120.4570

1 引言

激光测振仪(LDV)是一种功能强大的可精确测量振动的非接触式仪器,广泛应用于汽车的振动频率测量及微纳器件的振型测量中^[1-4]。其中激光扩束镜是该类仪器的关键部件。激光器发出的准直光进入扩束聚焦系统,通过扩束放大,然后聚焦在物体表面。市场上有很多扩束镜可供选用,但这些标准扩束镜大多用于扩束准直,无法满足测振系统扩束聚焦的应用需求。

价格昂贵的激光测振仪通常利用步进电机实现聚焦扫描,系统采用凹透镜结合前置凸透镜的方式。调焦部分依靠步进电机来实现,步进电机的转动带动与联轴器相连的丝杠转动,从而带动凸透镜移动^[5]。低成本的激光测振仪大多采用手动调焦的方式,其中旋转调焦、电动调焦等方式^[6-8]会造成前置镜头的旋转,在旋转过程中导致光束飘移,产生误差,这限制了其在皮米、纳米等高精度测量场景下的应用。本文设计了一种激光扩束聚焦透镜,在此基础上进一步给出了一种可以通过旋转实现透镜的前后移动,而又使透镜不发生旋转的机械结构。

收稿日期: 2017-02-10; **收到修改稿日期:** 2017-02-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA042603)、中国科学院青年创新促进会(2016200)、吉林省科技发展计划(20160203014GX)

作者简介: 武俊峰(1981—),男,博士,副研究员,主要从事精密光学仪器设计方面的研究。E-mail: awublack@126.com

2 设计分析

2.1 高斯光源模拟

激光扩束聚焦镜将光斑照射在物体表面,在物体表面形成的光斑大小会随距离的增加而增大。设计时需要考虑激光器的高斯特性。模拟氦氖激光的方法有多种,这里采用近轴高斯光束模拟的方法。束腰尺寸定义为:

$$\omega_0 = \frac{2\lambda}{\pi\theta}, \quad (1)$$

式中 ω_0 为激光束腰, λ 为激光波长, θ 为发散角。所使用的激光器为Thorlabs稳定型氦氖激光器HRS015B,激光波长为632.991 nm。光斑大小为0.7 mm,发散角小于1.4 mrad。可求得束腰大小为0.286 mm。利用Zemax的paraxial Gaussian beam data可以得出束腰与大小为0.7 mm光斑的距离为907 mm。将此作为以后计算不同距离下聚焦光斑大小的依据。

2.2 扩束镜的初始结构选取

从激光测振的要求出发,扩束镜大多采用伽利略结构,也就是凹凸透镜配合的方式,因为伽利略设计长度更短,没有内部焦点,而且输出图像不是倒立的,不需要校正镜头。

采用伽利略结构将凹面朝向输入光束方向,可以防止光束被反射回激光器,从而减小相位误差。对于0.7 mm的激光光斑,前侧凹透镜尺寸选为其3倍以上即可,这里选取入瞳直径为3 mm,凹透镜直径为6 mm。设计时主要考虑消除扩束镜的球差,采用双胶合透镜,另外考虑到反射光线的收集,选用直径为30 mm的双胶合透镜,焦距比在5~10倍之间,由实际选用的透镜决定。这里选择了具有-12 mm焦距的6 mm直径平凹透镜和具有100 mm焦距的30 mm直径平双胶合透镜作为初始结构,如图1所示。

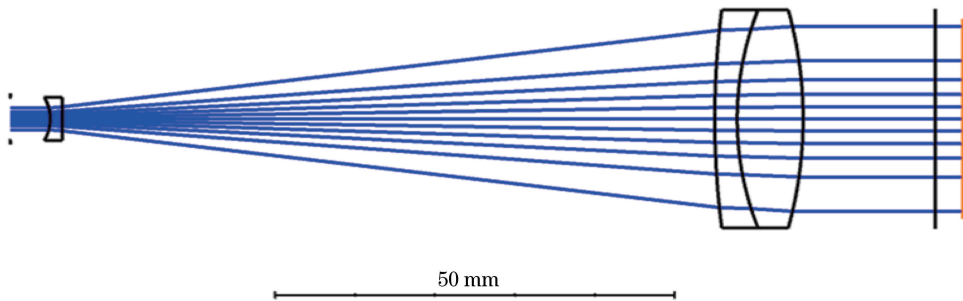


图1 扩束镜初始结构

Fig. 1 Initial structure of beam expanding lens

两透镜间距离为81.593 mm,激光扩束至无限远。波前畸变(PV)小于 0.001λ (λ 为波长),远小于 $\lambda/4$,认为其具有衍射极限,最小聚焦光斑尺寸即使在长距离下也能得到保证。

针对300,500,750,1000,2000,3000,4000,5000 mm聚焦距离下系统扩束聚焦后的光斑进行分析。分析中将凸透镜的最后一个面到焦面设置为marginal ray height类型,并利用TTHI操作数和GPBS操作数对系统进行优化,TTHI操作数控制凸透镜的最后一个面到焦面的距离,GPBS操作数设定高斯光束光斑大小的目标值最小化。凹透镜与凸透镜的间隔为设计变量。优化后分别得到300,500,750 mm聚焦距离下的聚焦情况,如图2所示。

初始结构按照最远处设计时,系统的8种结构中第一种结构(300 mm处)的波前差和球差是最差的。点列图、波前差、赛德尔图、光线特性曲线如图3所示。从点列图可以看出,光线分布仍然在瑞利半径以内;波前差小于0.085波长;从赛德尔图看出,主要的像差贡献是球面像差,约为0.005 mm;从光线特性曲线可以看到球面像差平衡较好。

2.3 聚焦光斑分析

聚焦距离与光斑大小关系如表1所示。可以看到,随着聚焦距离的不断变远,聚焦光斑的大小不断变大。这是由于拉氏不变量原理,像方孔径角与像高的乘积不变。所以在聚焦距离不断变远的过程中,随着像方孔径角不断变小,像高不断变大。当距离大于1000 mm时,聚焦距离每增加1000 mm,光斑大小增加量近似为90 μm 。



图2 不同聚焦距离下的聚焦图。(a)聚焦距离为 300 mm;(b)聚焦距离为 500 mm;(c)聚焦距离为 750 mm
Fig. 2 Focus figures under different focusing distances. (a) Focusing distance is 300 mm;
(b) focusing distance is 500 mm; (c) focusing distance is 750 mm

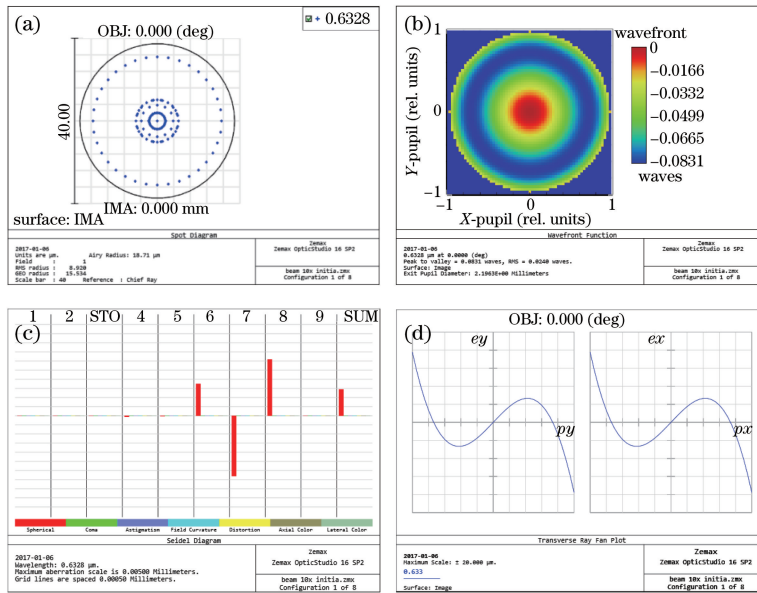


图3 系统的(a)点列图;(b)波前差;(c)赛德尔图;(d)光线特性曲线

Fig. 3 (a) Spot diagram; (b) wave front diagram; (c) Seidel diagram; (d) ray characteristic curves of the system

表1 聚焦距离与光斑大小关系

Table 1 Relationship between focusing distance and spot size

| Parameter | Value | | | | | | | |
|---------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Focusing distance /mm | 300 | 500 | 750 | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 |
| Spot size / μm | 31.1 | 48.9 | 66.8 | 87 | 172 | 258 | 344 | 430 |

3 机械结构设计

对需要用到的聚焦装置调整光束发散。可以采用旋转聚焦装置,如螺纹聚焦管,成本低廉。但这种装置在进行平移时需要旋转光学件,会造成输出光束漂移。如果采用滑动机构,滚针丝杠或螺旋筒,可使光学件沿光轴平移,而无需旋转,使光束漂移最小化,但是会增加系统成本。这里综合两种方式的特点设计了一种旋转导槽结合平移导槽的调焦装置,无需旋转透镜即能实现平移,平衡了复杂性。

调焦机械结构如图4所示,包括:1 前透镜套管,2 调焦管,3 主体支撑管,4 后透镜压环,5 限旋卡槽螺钉,6 限移卡槽螺钉,7 限位螺钉,8 前透镜,9 前透镜卡环,10 后透镜,11 后透镜配环。

调焦管2与主体支撑管3通过限旋卡槽螺钉5连接,限旋卡槽螺钉5在调焦管2上的环形卡槽中,调焦管2与主体支撑管采用过渡配合,保证调焦运动的平滑。调焦管2与前透镜套管1通过螺纹连接,在调焦管2的旋转作用下前透镜套管3实现前后移动,透镜套管3上有轴向的导向槽,从而保持透镜套管3以及前透

镜 8 不旋转。透镜套管 3 上装有前透镜 8, 使得前透镜 8 在水平方向上前后移动, 从而实现调焦的目的。当前透镜 8 达到最内侧时其焦点与后透镜 10 的焦点重合, 扩束为平行光束。在前透镜 8 从最内侧向最外侧运动的过程中激光焦点从无穷远不断向近处聚焦, 聚焦距离与前后透镜的距离关系如图 5 所示。

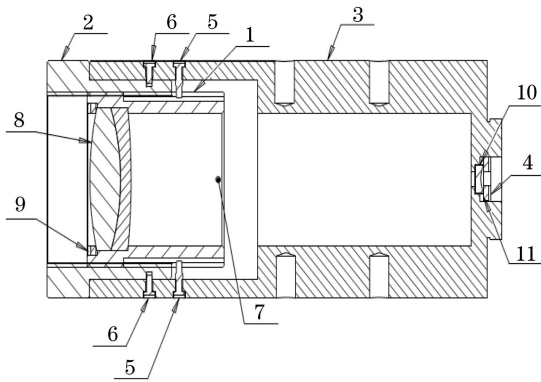


图 4 调焦机械结构示意图

Fig. 4 Schematic of focusing mechanism

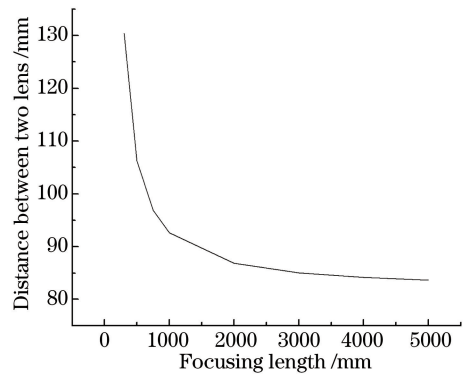


图 5 聚焦距离与前后透镜距离的关系

Fig. 5 Relationship between focusing distance and distance from front lens to rear lens

4 结 论

本文设计了一种用于激光测振的可调扩束聚焦镜, 从设计结果可以看出, 初始结构按照最远处设计时, 能够实现 0.3~5 m 范围内扩束聚焦的目的, 获得了系统在不同距离下的聚焦光斑大小。当物体与扩束聚焦镜距离大于 1 m 时, 光斑以 $90 \mu\text{m}/\text{m}$ 的大小增加。设计的机械结构满足了在调焦的过程中不旋转透镜的要求, 结构较为简单, 有望在较低成本的激光测振仪中得到应用。

参 考 文 献

- [1] Huang Zhen, Liu Bin, Dong Quanlin. Research on the torsional vibration measurement based on laser Doppler technique[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 389-392.
黄震, 刘彬, 董全林. 基于激光多普勒技术扭振测量的研究[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 389-392.
- [2] Liu Jiekun, Ma Xiushui, Ma Xie, et al. Review of laser Doppler vibrometer[J]. Laser Journal, 2014, 35(12): 1-5.
刘杰坤, 马修水, 马颀, 等. 激光多普勒测振仪研究综述[J]. 激光杂志, 2014, 35(12): 1-5.
- [3] Fan Zhe, Zhang Chunxi, Ou Pan, et al. Research on beam pointing angle for three-beam Doppler vehicle lidar[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0214001.
范哲, 张春熹, 欧攀, 等. 车载三波束多普勒激光雷达波束配置研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0214001.
- [4] Zhang Shu, Li Yu, Lu Guangfeng. Research of laser doppler vibrometer based on dual-frequency ring laser[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0312003.
张澍, 李玉, 卢广锋. 基于双频环形激光器的激光多普勒测振系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312003.
- [5] Lou Xinxin, Li Huafeng. A focusing and scanning system applied in laser vibrometers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(2): 19-22.
娄鑫鑫, 李华丰. 用于激光测振的聚焦扫描系统[J]. 计测技术, 2015, 35(2): 19-22.
- [6] Kong Xianglei, Hao Peiming. Optical design of zoom beam system[J]. Journal of Applied Optics, 2001, 22(5): 7-11.
孔祥蕾, 郝沛明. 变焦扩束系统的光学设计[J]. 应用光学, 2001, 22(5): 7-11.
- [7] Wang Peifang, Xiang Yang, Gao Jian, et al. Design of collimating and beam expanding laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922007.
王培芳, 向阳, 高健, 等. 激光变倍准直扩束系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922007.
- [8] Fan Yingjuan, Zhang Yanjun. Design of He-Ne laser beam focusing lens based on Zemax[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 1032-1035.
范应娟, 张艳军. 基于 Zemax 的 He-Ne 激光光束聚焦物镜的设计应用光学[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 1032-1035.