

激光与光电子学进展

基于光纤束的物镜设计与监控系统实现

唐健¹, 黄恠¹, 邓传鲁¹, 胡程勇¹, 张琦¹, 李金龙², 张小贝^{1*}, 王廷云¹¹上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444;²上海市计量测试技术研究院, 上海 200233

摘要 为保证电气电子设备在辐射抗扰度试验中状态传输的稳定性,设计并实现了适用于试验环境的光纤束监控系统。系统主要由物镜、光纤束、转接镜和电荷耦合器件等组件构成。通过 Zemax 光学仿真软件,结合光纤束参数设计并优化了监控系统的物镜。设计结果表明:物镜在空间频率 36 lp/mm 处,各视场光学调制传递函数值大于 0.8,像面大小与光纤束尺寸匹配,满足像方远心光路要求。对加工的物镜进行性能测试,表明其技术指标与理论设计比较相符。采用搭建的光纤束监控系统进行成像试验,并运用高斯滤波算法进行去像素化处理,提高了监控系统的视频传输质量,辐射抗扰度试验表明此系统具有良好的抗电磁干扰能力。

关键词 光学设计; 监控系统; 光纤束; 辐射抗扰度

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220736

Design of Objective Lens and Realization of Monitoring System Based on Fiber Bundles

Tang Jian¹, Huang Yi¹, Deng Chuanlu¹, Hu Chengyong¹, Zhang Qi¹, Li Jinlong², Zhang Xiaobei^{1*}, Wang Tingyun¹

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 200233, China

Abstract A fiber bundle monitoring system appropriate for test conditions is devised and implemented to assure the stability of the state transfer of electrical and electronic equipment in radiated immunity tests. Components such as the objective lens, fiber bundles, conversion lens, and charge coupled devices compose the majority of the system. The monitoring system's objective lens is designed and optimized using Zemax in conjunction with fiber bundle specifications. The design results show that the optical modulation transfer function value of each field of view of the objective lens is greater than 0.8 at the spatial frequency of 36 lp/mm, image area fits the fiber bundle size, and telecentric optical system in image space meets the criteria. The technical indicators of the processed objective lens are in line with the theoretical design, according to the performance test. The imaging experiment is conducted using the fiber bundle monitoring system, and the depixelation processing is achieved using the Gaussian filtering technique that improves the monitoring system's video transmission quality, and the system's anti-electromagnetic interference ability is demonstrated by the radiation immunity test.

Key words optical design; monitoring system; fiber bundles; radiated immunity

1 引言

辐射抗扰度试验是电磁兼容性(Electromagnetic

compatibility, EMC)试验中最基本的测试项目之一,试验的主要目的是通过发射不同场强的射频电磁场来测试样品的耐受性^[1]。在辐射抗扰度试验中,为减小

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-02-15; 录用日期: 2022-02-18; 网络首发日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(62022053, 61875116)、上海市市场监督管理局科技项目(2019-11)

通信作者: *xbzhang@shu.edu.cn

外界环境对监控系统视频传输质量的影响,需要在传统监控系统上添加电磁屏蔽箱及多重电磁兼容性设计,故增大了系统的占用体积,提高了整体成本。同时,在一些高场强的环境下,强电磁干扰通常会导致监控系统产生水波浪纹等异常界面,对试验结果的准确性也会造成影响^[2]。

光纤具有良好的导光性能,可作为光传输媒介。基于光纤电磁兼容特性,光纤通信可适用于强电磁干扰、高温高压等恶劣环境。光纤束是由多根一定长度的光纤有序排列组合而成,其中每根光纤可以看作图像传输的一个像素点,将图像信息分割成多个像素在光纤束中传递。光纤束可以由玻璃光纤^[3-4]、硫系玻璃光纤^[5-7]、聚合物光纤^[8-9]、空芯光纤^[10-12]等不同类型的纤维制备而成,在工业、医疗、军事等领域都已广泛应用。例如,在医疗领域中,基于光纤束的多种医用内窥镜可以检测器官组织的内部结构,是对组织细胞的放大成像,有助于医务人员对患者的病情做出准确判断^[13-15];在电磁干扰及特殊环境中,基于光纤束的成像系统实现了场景缩小成像,但设计的物镜参数与选用的成像器件参数不匹配,系统成像并未达到最优效果,难以应

用于试验场景^[16-18]。

本文基于辐射抗扰度试验的应用场景,设计并实现了一套光纤束监控系统。根据光纤束的结构参数,仿真并加工出满足像方远心光路要求的物镜。对加工的物镜进行性能测试,结果表明其技术指标与理论设计比较相符。通过分辨率测试卡对监控系统进行成像质量测试,并采用高斯滤波算法进行去像素化处理,提高了系统成像质量。辐射抗扰度试验结果表明搭建的系统具有良好的抗电磁干扰能力。

2 系统概述与物镜设计要求

光纤束监控系统(如图 1 所示)主要由物镜、光纤束、转接镜、电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)和计算机构成。被监测物体通过物镜将信息会聚至光纤束的入射端面,利用光纤束进行传输,在出射端面将图像信息通过转接镜传递到 CCD 的感光面,最后在 CCD 内部进行光电转换,利用软件实时处理并显示在计算机中。在光纤束监控系统中,物镜的作用是将

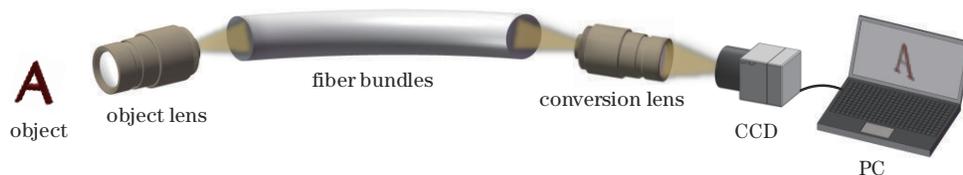


图 1 光纤束监控系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fiber bundles monitoring system

监控系统需要监测试验室内场景,所以选取了一款矩形截面的光纤束,如图 2(a)所示,其端面大小为 8 mm×8 mm、数值孔径(Numerical aperture, NA)为 0.6,光纤束由二十万根光纤单丝组成。图 2(b)、图 2(c)分别是在 100×、500×显微镜(MV3000,南京

瑞元光学仪器有限公司)下观测的光纤束端面形貌,其中光纤纤芯直径为 12.764 μm,光纤单丝直径为 16.508 μm。在静态环境下,光纤束的排列方式为六边形结构,计算出光纤束的极限分辨率为 36 lp/mm^[19]。

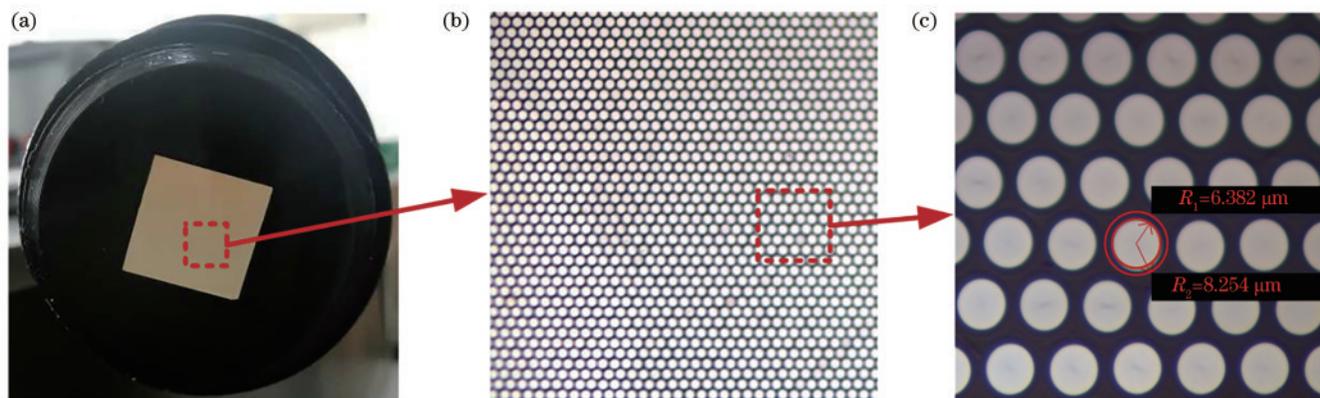


图 2 矩形截面的光纤束。(a) 光纤束端面;(b) 100×显微镜下观测的光纤束端面放大图;

(c) 500×显微镜下观测的光纤束端面放大图

Fig. 2 Fiber bundles of rectangular cross-section. (a) End face of fiber bundles; (b) one hundred×under microscope enlarged image of fiber bundle end face observed; (c) five hundred×under microscope enlarged image of fiber bundle end face observed

物镜设计指标需匹配光纤束的参数特性,将物镜工作波长设为可见光波长,物距设为 1 m,视场角为 76°,像高需满足光纤束端面尺寸,选择像高为 8 mm。根据光纤束的极限分辨率,要求物镜在该分辨率下光学调制传递函数(Modulation transfer function, MTF)的值应大于 0.8 才能保证较好的成像效果,同时为保证物镜像面亮度的均匀性,需要各视场相对照度尽可能大^[20]。光纤束传输图像通过单根光纤传光完成,因此也需要满足光纤的全反射条件,要求物镜像方数值孔径匹配光纤束数值孔径。此外,普通光学成像系统轴上物点的光线都可以进入光纤束中,但远离光轴的物点发出的部分光线无法进入到光纤束中,为保证物镜光线不会损失,应将光路设置为像方远心系统^[21],使远心系统各点的像方主光线与光轴平行,保证了亮度均匀性,同时也提高了成像质量。具体设计要求如表 1 所示。

表 1 物镜设计要求

Table 1 Design requirements of objective lens

Parameter	Value
Wavelength /nm	486,587,656
Image size /mm	8
Angle of view / (°)	76
Relative illuminance	>0.8
Telecentricity / (°)	<1
F number	4
MTF at 36 lp/mm	>0.8
NA	<0.6

3 设计结果与分析

3.1 设计结果

确定好设计指标和要求后,选择合适结构,利用 Zemax 软件设计并优化^[22-23]。在优化过程中,主要采用实际光线坐标操作数控制像高、实际光线入射角度操作数控制主光线角度、相对照度和操作数数值大于组合操作数来控制像面照度以及使用球差和轴向像差组合操作数控制球差等方法。优化后,物镜

在各像高处的主光线角度(Chief ray angle, CRA)均小于 1°,基本满足像方远心要求,同时物镜像方 NA 为 0.124,小于光纤束的 NA,符合光纤束的传输条件,可保证所有光线能完全进入光纤束中。优化后的物镜参数如表 2 所示,光路结构如图 3 所示,Lens1 和 Lens2 用来扩大视场角并收集视场角内的所有光线;Lens3 和 Lens4 接受前组镜片传来的光线并进行角度收敛,可以减小后面镜片的直径尺寸;Lens5 和 Lens6 组成双胶合透镜置于光阑后,用于减小像差;Lens7 和 Lens8 接受光线并将光线会聚到光纤束的入射端面,同时保证像高与光纤束端面尺寸的匹配。图 3 中相同颜色的透镜代表使用了同一种玻璃材料。

表 2 物镜结构参数

Table 2 Structural parameters of objective lens

Surface	Radius / mm	Thickness / mm	Material	Semidiameter / mm
OBJ	Infinity	1000.000	-	790.493
1	38.566	1.000	H-LAF3B	9.113
2	11.450	3.322	-	7.646
3	Infinity	1.000	H-LAF3B	7.533
4	17.550	9.859	-	7.129
5	-23.920	3.000	H-LAK4L	7.439
6	-14.552	9.449	-	7.736
7	13.060	2.600	H-ZBAF50	5.800
8	Infinity	8.622	-	5.440
STO	Infinity	3.066	-	1.228
10	-5.343	2.160	H-ZF6	2.107
11	14.522	3.000	H-QK3L	3.211
12	-6.685	0.150	-	4.000
13	49.420	2.400	H-LAK4L	4.643
14	-13.060	0.130	-	4.900
15	17.550	1.950	H-LAK4L	5.062
16	Infinity	9.296	-	4.983
IMA	Infinity	-	-	3.983

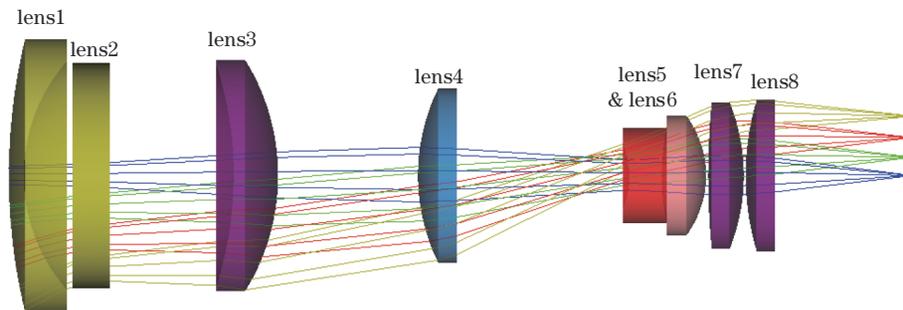


图 3 物镜光路结构

Fig. 3 Optical path structure of objective lens

3.2 像质评价

图 4(a)为物镜的 MTF 曲线,表示空间频率和图像对比度的关系,可以最真实地反映物镜实际成像质量,由图 4(a)可知,在光纤束极限分辨率 36 lp/mm 处,物镜各视场的 MTF 值均大于 0.8,说明光纤束监控系统具有良好的图像传输能力,满足设计要求。图 4(b)为相对照度曲线,该曲线表示各视场照度与中心视场照度的比值,随着视场增大,照度有所下降,如果边缘视场的照度不够高,会导致图像的边缘区域变暗,由图 4(b)可知,物镜在各视场的相对照度均大于 0.8,表明在全视场内的照度较为均匀。图 4(c)为色差焦移曲

线,纵轴为可见光波长,横轴为每个波长对应的实际焦面与参考波长焦面之间的轴向距离^[24]。其中参考波长为 587 nm,最大焦移为 26.886 μm,小于衍射极限的焦面位移最大值 37.510 μm,色差也得到了很好的校正。图 4(d)为物镜的能量集中度曲线,由图可知,90% 以上的能量主要集中在直径为 16 μm 的圆内,能量在光纤束中传输较为集中。图 4(e)为点列图,表示物点发出的光线经过光学系统后,会形成一个散布在一定范围内的弥散图形,在各个视场下最大几何弥散斑直径为 5.366 μm,小于光纤束单丝直径 16 μm,光线较集中,满足系统成像要求。

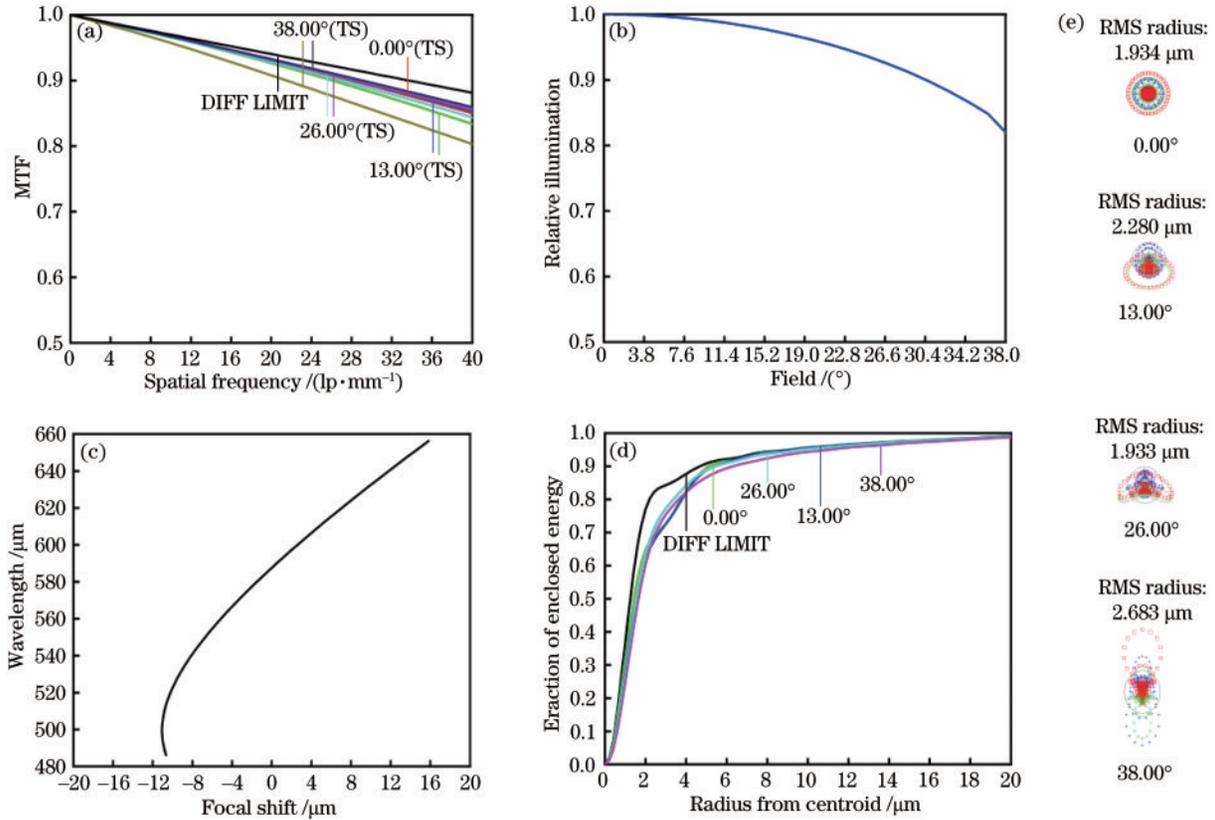


图 4 物镜评价指标。(a) MTF 曲线;(b)相对照度曲线;(c)色差焦移曲线;(d)能量集中度曲线;(e)点列图

Fig. 4 Evaluation index of objective lens. (a) MTF curve; (b) relative illumination curve; (c) chromatic focal curve; (d) encircled energy curve; (e) geometric spot diagrams

3.3 公差分析

为保证在加工装配后能达到成像要求,需进行公差分析。主要步骤是根据加工经验设定一个初始公差分配值进行评价,若公差分配结果下降较大,此时根据结果找到影响公差下降最主要的因素,并适当改变公差值,继续进行公差分析直至满足加工要求。使用 Zemax 软件对所设计的物镜进行公差分析,公差分配值如表 3 所示,其中,Radius 为曲率半径公差、Thickness 为厚度公差、S+A Irregularity 为表面不规则度公差、Decenter 为元件偏心公差、Tilt 为元件倾斜公差、Index 为折射率公差、Abbe number 为阿贝数公差。

表 3 物镜公差分配

Table 3 Objective lens tolerance distribution

Tolerance	Value
Radius /fringes	3
Thickness /mm	0.02
S+A Irregularity /fringes	0.3
Decenter /mm	0.02
Tilt /(°)	0.05
Index	0.001
Abbe number	1

根据经验以及目前中等精度的加工工艺和装调水平,给定公差分配数,通过后焦距作为补偿量,选

择截止频率为 36 lp/mm 处的 MTF 平均值作为评价标准,采用蒙特卡罗法进行分析,其结果如表 4 所示。在公差给定范围内,90% 以上的 MTF 在 36 lp/mm 处大于 0.820,表明物镜在公差允许的范围内,仍具

有良好的成像质量。

4 加工与测试

采用 SolidWorks 设计软件对物镜的机械结构进行设计,物镜横截面如图 5(a)所示,其装配主要由镜筒、隔圈、压圈和接圈完成。其中,压圈和镜筒装配在物镜外部,二者组合保证物镜的机械稳定性。隔圈分别装配在各个透镜中间,固定每个透镜的位置,同时也能起到减小杂散光的作用。由于物镜的后焦距较短,未能达到工业镜头 C 接口的距离要求,因此在物镜外侧装配接圈,以保证 C 接口相机接入时能够正常成像。物镜加工实物如图 5(b)所示,其总长度约 54 mm。

表 4 MTF 概率分布
Table 4 Distribution of MTF probability

Probability / %	MTF of objective lens
≥90	0.820
≥80	0.830
≥50	0.843
≥20	0.850
≥10	0.851

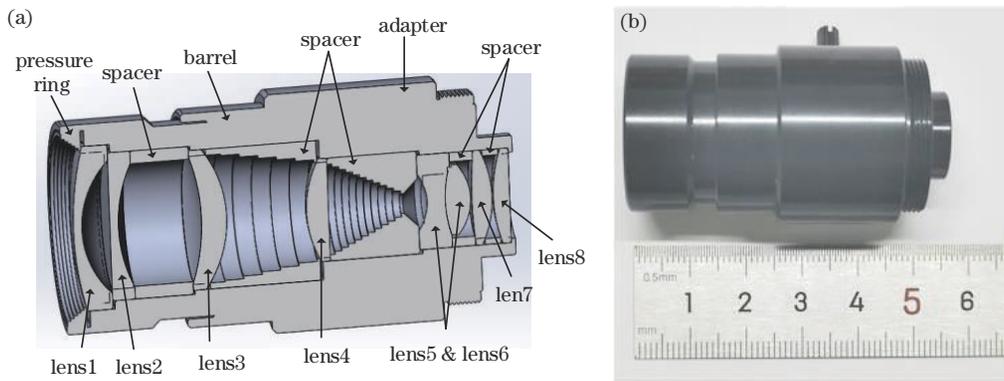


图 5 物镜的内部结构与实物。(a)剖视图;(b)实物图

Fig. 5 Interior structure and physical diagram of objective lens. (a) Sectional view; (b) physical diagram

为了验证所加工物镜的光学性能,采用光学传递函数测量仪(ImageMaster® HR,北京全欧光学检测仪器有限公司)对物镜的相对照度、CRA 和 MTF 进行测试。相对照度测试结果如图 6(a)所示,与图 4(b)进行对比,发现相对照度数值基本保持一致,其原因主要是相对照度作为物镜的固有属性,加工与装配过程不会对其相对照度的变化。CRA 的测试类型为成像高度,如图 6(b)所示,物镜总像高为 8 mm,主光线在任

意成像高度上与光轴的角度均小于 1°,达到了物镜设计要求。

MTF 测试的工作距离设定为无穷远,测试类型设定为视场角,测试的最大空间频率为 150 lp/mm,间隔为 2 lp/mm,0°,12°,25.5°和 38.7°等 4 个视场的仿真和测试数据分别如图 7(a)~图 7(d)所示。MTF 在 150 lp/mm 处各视场的下降量均小于 0.15,是加工过程中可以接受的下降范围^[18]。

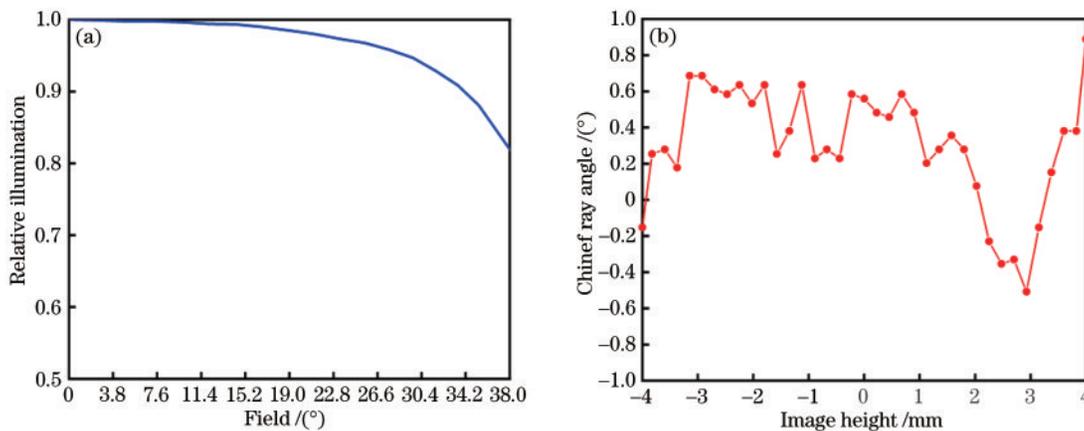


图 6 相对照度测试与 CRA 曲线。(a) 相对照度测试曲线;(b) CRA 曲线

Fig. 6 Relative illumination test and CRA curve. (a) Relative illumination test curve; (b) CRA curve

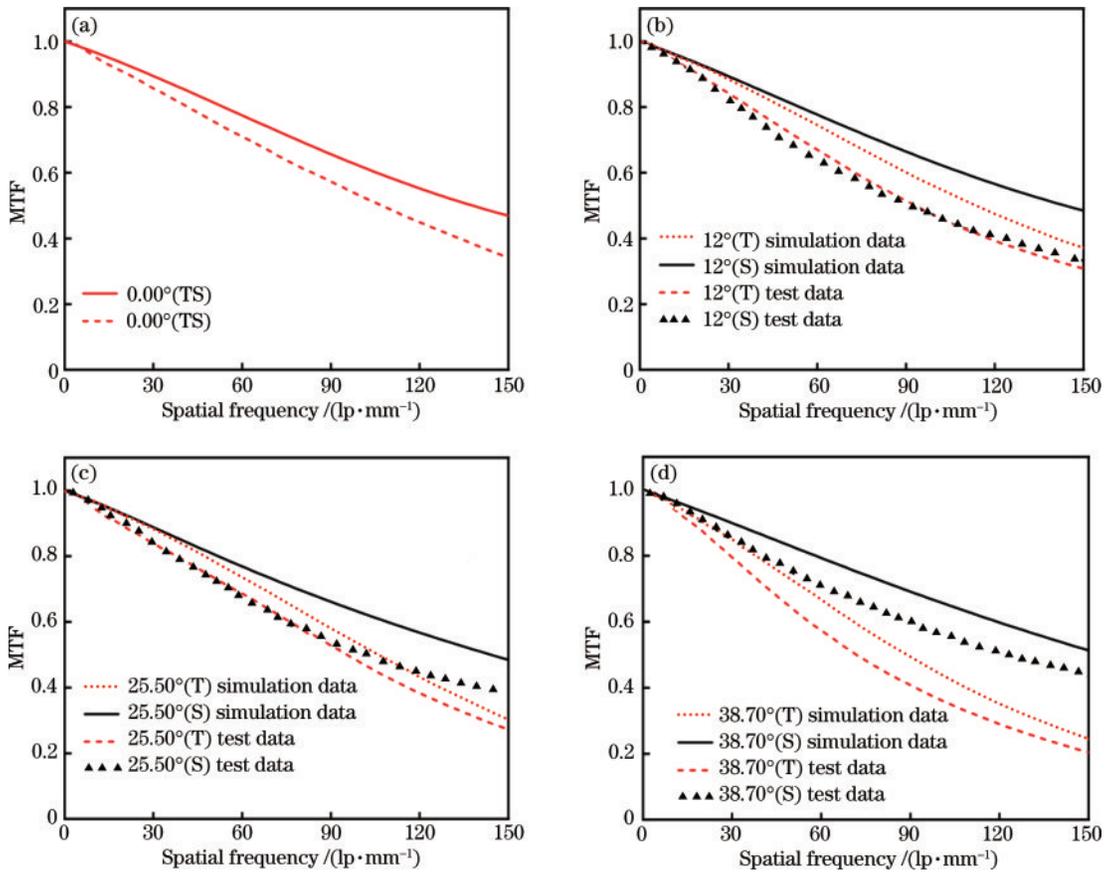


图 7 MTF 仿真与测试对比图。(a)0°;(b)12°;(c)25.5°;(d)38.7°

Fig. 7 Comparison diagrams of MTF simulation and test. (a) 0°; (b) 12°; (c) 25.5°; (d) 38.7°

5 系统搭建与成像分析

选择一款分辨率为 500 万像素的彩色 CCD (MER-503-36U3C, 大恒图像) 进行图像采集, 同时为了将光纤束出射端的光线尽可能地全部耦合到 CCD 的感光芯片上, 选择物方远心镜头作为转接镜, 该转接镜工作距离为 35 mm, 物高为 10 mm, 大于光纤束端面尺寸。镜头外部装配结构为 C 接口螺纹, 光纤束两端装配结构为标准 M24 螺纹, 根据镜头和光纤束的结构

特点设计系统装配的耦合部件。耦合部件一端为标准 C 接口, 连接物镜及转接镜; 另一端为 M24 接口连接光纤束, 其总长设计为 30 mm, 保证系统装配时调焦的灵活性, 并通过固定环进行固定, 确保系统装配的稳定性。组装的光纤束监控系统整体图如图 8(a) 所示, 主要包括前置成像模块和后置转换模块, 分别如图 8(b)、图 8(c) 所示。前置成像模块包括物镜、耦合部件、光纤束入射端; 后置转换模块包括光纤束出射端、耦合部件、转接镜和 CCD。

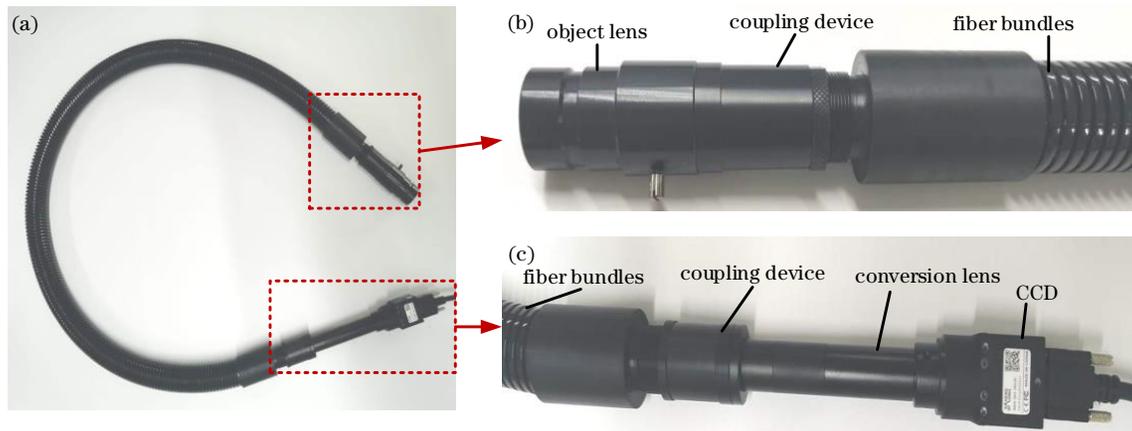


图 8 光纤束监控系统的搭建。(a)光纤束监控系统;(b)前置成像模块;(c)后置转换模块

Fig. 8 Construction of fiber bundles monitoring system. (a) Fiber bundles monitoring system; (b) front imaging module; (c) post conversion module

光纤束监控系统的测试卡矢量图如图 9(a)所示,采用 ISO 12233 标准型分辨率测试卡来测试系统的图像传输质量;系统拍摄的图片如图 9(b)所示,可以清楚观察测试卡各个部分的形貌。选择图 9(b)中的虚线框,使用楔形线测试方式对系统的分辨率进行测试^[25],放大后的楔形线如图 9(c)所示,分别对中心水平分辨率、中心垂直分辨率和斜 45°分辨率进行观测,通过目测可以分辨黑白线的部位为 4.25,测试卡的标度为 100×,所以观测的测试结果为 425 线,同时采用

测试软件中的手动分析功能测得其分辨率为 416 线,两种测试方式之间的误差很小,表明系统整体成像效果良好。

由于光纤束传像具有像素化的特点,对监控系统的成像效果会产生一定影响,如图 9(d)所示。在不影响视频传输实时性的情况下,采用高斯滤波算法对图 9(d)进行去像素化处理^[26],其处理结果如图 9(e)所示,图中表明此处理方法能较好地去除图像的像素化,达到预期要求。

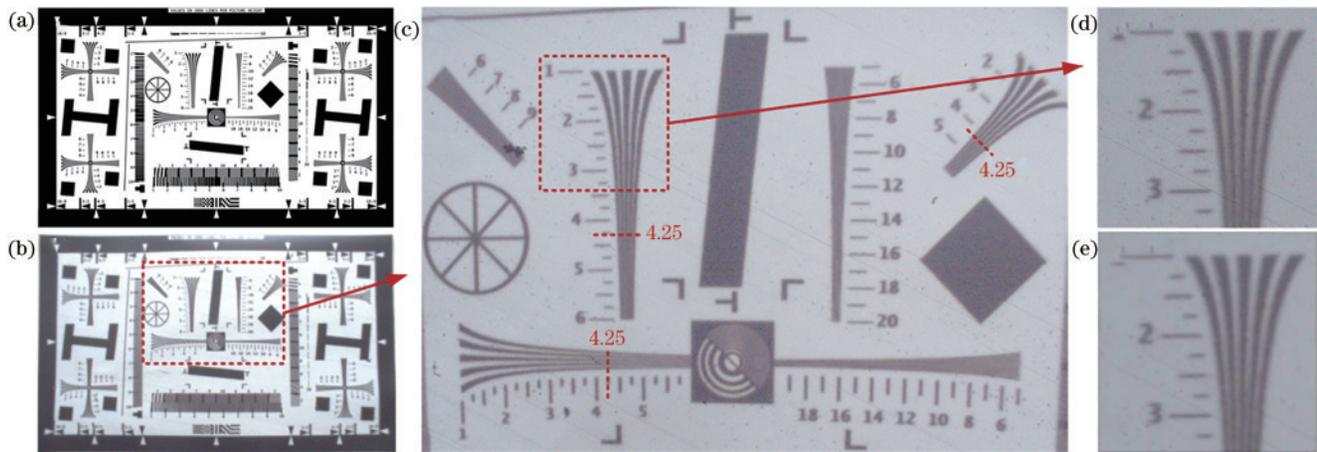


图 9 光纤束监控系统的测试结果。(a)测试卡矢量图;(b)系统成像图;(c)楔形线测试图;(d)像素化图;(e)去像素化图
Fig. 9 Test result of fiber bundles monitoring system. (a) Vector graph of test card; (b) resulting image of system; (c) test image of TV line; (d) pixelated image; (e) depixelated image

为了客观评价滤波算法对图像处理的效果,分别计算了原始图像和处理后图像的均值、标准差和平均梯度,如表 5 所示。3 种评价指标均为无参评价,数值越大代表图像质量越好,表中数据表明经高斯滤波算法处理后的图像各个指标均有所上升,图像质量得到了一定的提升。

表 5 图像评价指标对比

Table 5 Comparison of image evaluation index

Quality assessment	Original image	Processed image
Mean	105.480	106.180
Standard deviation	19.778	21.922
Mean gradient	2.161	9.964

在上海市计量测试技术研究院的辐射抗扰度试验室内对监控系统进行抗电磁干扰试验。试验中所使用的频率范围为 800 MHz~5 GHz 的高增益喇叭天线如图 10(a)所示,图 10(b)、图 10(c)分别为未加和加辐射干扰情况下系统传输的图像,两幅图像并未产生明显的差异,利用结构相似性系数 (Structural similarity, SSIM)^[27] 指标计算出两幅图的 SSIM 值为 0.971,具有较高的相似度,表明系统具有较好的抗电磁干扰能力。

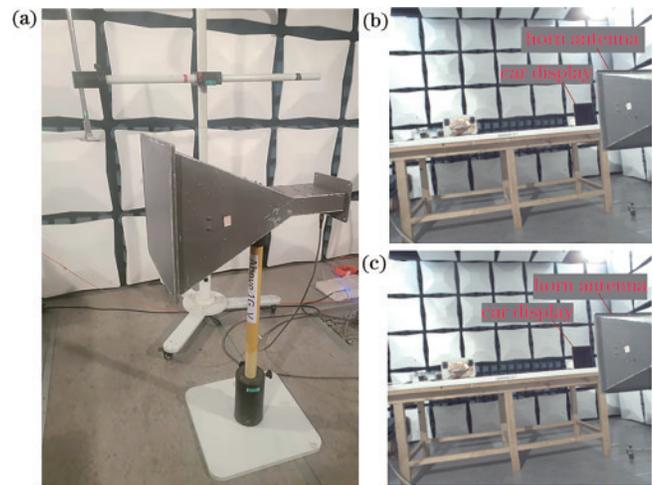


图 10 辐射抗扰度试验。(a)喇叭天线;(b)未施加干扰传输;(c)施加干扰传输
Fig. 10 Radiated immunity test. (a) Horn antenna; (b) without interference transmission; (c) with interference transmission

6 结 论

根据辐射抗扰度试验需求,设计并搭建了一套光纤束监控系统。基于像方远心光路设计理念,利用 Zemax 软件设计出符合光纤束参数的物镜,并进行实

际加工,理论与实际测试结果皆表明物镜各视场的 MTF 值在光纤束极限分辨率处大于 0.8,具有较高的成像质量。利用分辨率测试卡对监控系统进行成像质量测试,并采用高斯滤波算法进行去像素化处理,进一步提高了系统成像质量。辐射抗扰度试验结果表明所搭建的监控系统具有较好的抗电磁干扰能力,具有重大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y, Zhang X, Chen L, et al. Research on vehicle radiation immunity test method based on actual electromagnetic environment[C]//2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, June 3-7, 2019, Sapporo, Japan. New York: IEEE Press, 2019: 468-471.
- [2] 樊全会,李鹏飞,王磊.视频监控系统中干扰问题研究[J].软件导刊,2012,11(2):135-136.
Fan Q H, Li P F, Wang L. Research on interference problem in video surveillance system[J]. Software Guide, 2012, 11(2): 135-136.
- [3] Ventura A, Slimen F B, Lousteau J, et al. Flexible Mid-IR fiber bundle for thermal imaging of inaccessible areas[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20259-20272.
- [4] Morova B, Bavili N, Yaman O, et al. Fabrication and characterization of large numerical aperture, high-resolution optical fiber bundles based on high-contrast pairs of soft glasses for fluorescence imaging[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9502-9515.
- [5] 翟诚诚,张斌,祁思胜,等.柔性硫系玻璃光纤传像束的制备及性能研究[J].光学学报,2015,35(8):0806005.
Zhai C C, Zhang B, Qi S S, et al. Fabrication and properties of flexible chalcogenide fiber image bundles[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806005.
- [6] Zhang B, Zhai C C, Qi S S, et al. High-resolution chalcogenide fiber bundles for infrared imaging[J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4384-4387.
- [7] Qi S S, Zhang B, Zhai C C, et al. High-resolution chalcogenide fiber bundles for longwave infrared imaging[J]. Optics Express, 2017, 25(21): 26160-26165.
- [8] 孔德鹏,王丽莉,贺正权,等.新型聚合物传像光纤制作方法探索[J].中国激光,2013,40(1):0105004.
Kong D P, Wang L L, He Z Q, et al. Development of the fabrication method for novel polymer imaging fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0105004.
- [9] Kong D P, Wang L L. Ultrahigh-resolution fiber-optic image guides derived from microstructured polymer optical fiber preforms[J]. Optics Letters, 2009, 34(16): 2435-2437.
- [10] Matsuura Y, Naito K. Flexible hollow optical fiber bundle for infrared thermal imaging[J]. Biomedical Optics Express, 2010, 2(1): 65-70.
- [11] Wood H A C, Harrington K, Birks T A, et al. High-resolution air-clad imaging fibers[J]. Optics Letters, 2018, 43(21): 5311-5314.
- [12] 朱晓松,周志云,石艺尉.内窥镜的红外激光传输用柔性空芯光纤的研制[J].光学学报,2007,27(12):2123-2127.
Zhu X S, Zhou Z Y, Shi Y W. Flexible infrared hollow fiber used in endoscopic laser light delivery[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12): 2123-2127.
- [13] 张伟,牛春阳,游兴海,等.高倍率大视场细胞内镜成像系统研究[J].光学学报,2021,41(17):1717001.
Zhang W, Niu C Y, You X H, et al. Endocytoscopic imaging system with high magnification and large field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1717001.
- [14] Wang H B, Zhang N C, Zuo S Y. Low-cost and highly flexible intraoperative endomicroscopy system for cellular imaging[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): 1554-1561.
- [15] Yang L, Wang J F, Tian G, et al. Five-lens, easy-to-implement miniature objective for a fluorescence confocal microendoscope[J]. Optics Express, 2016, 24(1): 473-484.
- [16] 徐冬金,黄恹,邓传鲁,等.强电磁干扰环境下光纤束传像系统的设计研究[J].应用光学,2020,41(6):1289-1297.
Xu D J, Huang Y, Deng C L, et al. Design and research of image transmission systems with fiber bundles in environment of strong electromagnetic interference[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(6): 1289-1297.
- [17] 王金猛.长距离塑料光纤摄像机的光学设计及应用基础研究[D].西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2012:49-61.
Wang J M. The optical design and applied fundamental research of long-distance plastic fiber-optic camera[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 49-61.
- [18] 景桂芬.基于光纤的监测光学系统设计[D].长春:长春理工大学,2019:26-44.
Jing G F. Design of optical system for monitoring based on optical fiber[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 26-44.
- [19] 闫兴涛,杨建峰,薛彬,等.利用光纤传像束的内窥镜物镜设计[J].红外与激光工程,2013,42(2):423-427.
Yan X T, Yang J F, Xue B, et al. Design of the objective lens for endoscope with imaging fiber bundle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 423-427.
- [20] 郭智元,李建聪,陈太喜,等.单中心超广角手机镜头设计[J].激光与光电子学进展,2020,57(7):072204.
Guo Z Y, Li J C, Chen T X, et al. Design of single-center and ultra-wide-angle mobile phone lenses[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072204.
- [21] 朱晓冬,叶兵,李凯,等.微型光纤传像束内窥镜的物镜设计[J].应用光学,2018,39(3):418-422.
Zhu X D, Ye B, Li K, et al. Objective lens design of subminiature endoscope with image fiber bundles[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(3): 418-422.
- [22] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].3版.北京:机械工业出版社,2011:114-135.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 114-135.
- [23] 袁旭沧.光学设计[M].北京:科学出版社,1983:224-241.
Yuan X C. Optical design[M]. Beijing: Science Press,

- 1983: 224-241.
- [24] 杨莉. 用于荧光共聚焦内窥镜的微型显微物镜研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 31-36.
Yang L. Design of miniature objectives for fluorescence confocal microendoscopy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 31-36.
- [25] 鄢天川. 摄像模组的解像力检测方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017: 39-56.
Yan T C. The research on resolution detecting methods of camera module[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017: 39-56.
- [26] 张云. 共聚焦显微内镜图像的去像素化方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 27-40.
Zhang Y. Depixelation methods research of the confocal endomicroscopy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 27-40.
- [27] 陈天宝, 曾雪峰, 白莹莹, 等. 光子集成干涉成像图像重构: 熵先验[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2311002.
Chen T B, Zeng X F, Bai Y Y, et al. Image reconstruction of photonics integrated interference imaging: entropy prior[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2311002.