

doi: 10.3788/gzxb20144302.0222002

推扫式红外光纤传像光学系统研究

赵意意^{1,2}, 杨建峰¹, 闫兴涛^{1,2}, 李福¹, 薛彬¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对推扫式红外遥感成像技术在高分辨对地观测领域的重要地位, 结合我国红外遥感技术发展现状和长线阵红外探测器技术水平, 研究了利用线面转换的异型红外光纤传像束线阵端实现推扫, 面阵端与成熟的小面阵红外探测器耦合以获得高分辨红外遥感图像的光纤传像系统. 分析了该红外光纤传像系统前置物镜和耦接镜设计中的主要问题, 并针对一种入射端为 $4\,000 \times 6$ 元线阵, 出射端为 160×150 元面阵的红外光纤传像束设计了前置物镜系统和后继耦接镜系统. 引入平均传递函数的方法对整体光学系统的 MTF 进行了模拟评价, 模拟结果显示整体光学系统成像良好, 两系统的成像性能皆达到衍射极限, 满足光纤传像系统的特殊要求, 可为该类光纤传像系统的设计提供参考.

关键词: 光学设计; 红外成像; 光纤束; 物镜; 耦接镜

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0222002-5

Study of Push-broom Infrared Fiber Image Transmission System

ZHAO Yi-yi^{1,2}, YANG Jian-feng¹, YAN Xing-tao^{1,2}, LI Fu¹, XUE Bin¹

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The push-broom infrared remote sensing imaging technology plays an important role in the high-resolution earth observation, but the internal development of infrared imaging technology is baffled by the technical level of long-linear array infrared detector. To achieve high-resolution push-broom infrared imaging, a method by the use of line-plane-switching infrared fiber bundle was proposed. In this method, the linear array end of the imaging fiber bundle was used as a long-linear array infrared detector and the plane array end of the bundle was coupled by a mature small infrared focal plane array with the single fiber corresponding to the pixel of the focal plane. The main problem of the design of the objective lens and coupling lens in the infrared fiber image transmission system was analyzed. And a system with an objective lens and an coupling lens was designed for a kind of fiber bundle which has $4\,000 \times 6$ pixels on its entrance end and has 160×150 pixels on its exit end. The imaging performance of the objective lens and coupling lens were close to the diffraction limits while meeting special requirements of infrared fiber image transmission system. The presented design is a better reference for this kind of fiber image transmission system. The mean transfer function was introduced for evaluating the MTF of the overall optical system, and the simulation results show a good image quality.

Key words: Optical design; Infrared imaging; Fiber bundle; Objective lens; Coupling lens

OCIS Codes: 220.0220; 110.3080; 060.2350

0 引言

红外探测技术是信息获取的主要手段之一, 红外

系统的核心是红外探测器. 实践证明, 红外器件水平的提高和新一代器件的出现, 就会使红外整机性能大幅提升甚至更新换代, 所以有“一代器件、一代整机、一代

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2010AA122203)资助

第一作者: 赵意意(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光学系统设计. Email: zyzjlx@gmail.com

导师(通讯作者): 杨建峰(1968-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学系统设计和光谱成像技术. Email: yangjf@opt.ac.cn

收稿日期: 2013-06-03; 录用日期: 2013-09-03

<http://www.photon.ac.cn>

装备”之说^[1]. 文献[2]通过对航天光学遥感器的需求分析指出,线阵红外探测器的像元数需要覆盖 1024 元~7200 元的范围. 现阶段的红外线阵探测器像元一般在千元以下,无法完成大视场推扫探测的需求. 由于红外探测器水平所限,国外空间红外观测卫星通常采用探测器拼接的方法实现长线阵,而国内至今尚无用于空间天文观测及其他空间科学研究用的空间红外观测卫星.

虽然超长线阵红外探测器存在技术难题,但是目前面阵红外探测器如 256×256 元、 320×256 元等都有成熟产品,在红外热像仪等实践中已得到广泛运用. 与此同时,随着新型材料和拉丝工艺的不断进步,红外光纤传像束近年也有长足进步,在医疗仪器、光谱成像等方面都有应用^[3].

异型结构光纤传像束在遥感相机方面的应用,法国研究机构 MATRA DEFENSE 使用异型光纤传像束研制了推扫式红外探测的工程样机,证明了该方法的可行性. 但其样机传像束线阵端仅有 256 像元^[4]. 美国的 A. Daniels 将红外光纤传像束应用于导弹告警接收器上以实现红外探测器制冷装置与成像系统的分离^[5]. 虽然并没有异型光纤传像束的线面转换,但是其基本结构与本文所要设计的红外光纤传像系统相似.

国内上海技术物理研究所开展了相关研究并发表相关文章^[6-9],但其工程实现仅限于利用可见光波段. 关于红外探测方面更为成熟和完善的系统还未见报道,所以开展红外光纤传像束在高分辨率红外相机中的应用研究工作处于科学前沿,有许多值得探究的地方.

本文拟在推扫式红外遥感相机中引入一种入射端呈线阵排列,出射端为面阵排列且光纤间相关排列的异型结构光纤传像束,利用光纤传像束入射端线阵替代推扫式红外遥感相机中需要的长线阵探测器,使前置望远光学系统的像面与传像束入射端耦合,而在其出射端用相应的后继耦接光学系统与小规模面阵红外探测器耦合,由面阵红外探测器像元接收光纤传像束每根光纤出射的信息,实现红外图像的空间传输和线面转换,再经相应的数字图像处理技术复原出系统线视场下对应的图像,这样利用小面阵探测器即可实现地物的推扫式红外遥感成像.

1 红外光纤传像系统原理

图 1 为西安光机所研制的一种特殊排列的红外异型结构光纤传像束. 该传像束的一端为 $4\,000 \times 6$ 元的线阵,另一端重新相关排列为 160×150 元的面阵. 光纤的透光波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中波红外波段. 光纤数值孔径为 0.2,单丝光纤直径 $50 \mu\text{m}$.

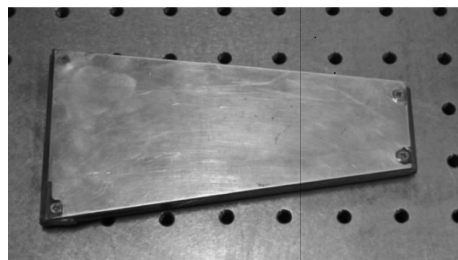


图 1 红外光纤传像束

Fig. 1 Infrared fiber bundle

本文基于该红外异型结构光纤传像束设计了一种光学系统来实现红外大线阵推扫成像. 光学系统的基本结构如图 2 所示,由前置望远光学系统、线面转换异型光纤传像束、后继耦接光学系统和制冷型面阵红外探测器组成.

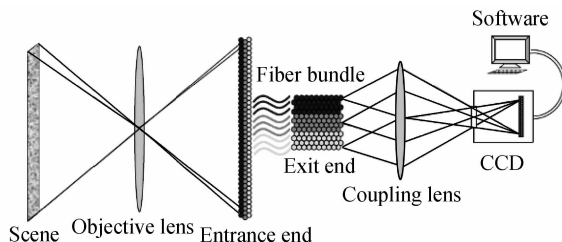


图 2 红外光纤传像系统示意图

Fig. 2 Layout of infrared fiber image transmission system

系统的基本工作原理,前置物镜将某一条带刈幅地物成像至位于其像方焦平面处的异型光纤传像束入射端线阵上,异型光纤传像束入射端为 $4\,000 \times 6$ 元的线阵,该异型光纤传像束利用光纤的柔韧性和空间自由度,通过光纤的重新相关排列,实现入射端线阵到 160×150 元面阵的空间变换. 光纤传像束出射端面阵作为后继耦接光学系统的物面,由后继耦接镜进行适当缩放成像,使得面阵排列的光纤束所发出的光成像于制冷型红外探测器上. 最后由后续图像处理部分进行适当处理和空间逆变换实现面阵图像到线列图像的复原,得到推扫光学成像系统焦平面处刈幅图像,再经多幅连续的时间序列刈幅图像融合实现推扫式成像的重建.

2 前置物镜设计

前置物镜的作用是将物体成像在光纤传像束入射端线阵上. 光纤传像是利用光纤全反射实现的,只有小于光纤数值孔径的光束能够在光纤中传播,因此前置物镜的数值孔径一定要小于等于光纤数值孔径. 在非像方远心系统中,零视场处成像光束的立体角是相对光轴对称的,且光束正入射到光纤输入端面;而轴外物点的入射光束关于主光线对称,是斜入射到光纤输入端面的,如图 3(a). 因此,轴外光束的一部分上光线或下光线的入射角将可能超过传像束的数值孔径角,导

致部分光线被遮拦.为了保证轴上物点和轴外物点的全部成像光束都能进入传像束中传播,应将物镜设计成像方远心系统^[10-11],如图3(b).

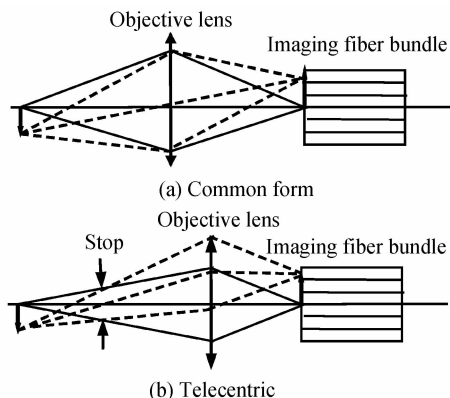


图3 传像光纤束前置物镜

Fig. 3 Front object lens of fiber bundle

前置物镜光学系统设计主要考虑以下几个问题:

1)系统像方数值孔径小于或等于光纤传像束的数值孔径;2)需将系统设计成像方远心结构;3)系统像方线视场应等于光纤传像束入射端尺寸;4)系统既要保证成像到光纤传像束入射端的光照度又要保证系统的截止频率高于光纤传像束极限分辨率.

本文光学系统的设计主要应用于样机的实现,因此光学系统采用易安装实现的透射系统.光纤传像束入射端线阵长度为200 mm,为了满足如此大的像方线视场,前置物镜有两种选择:大视场或长焦距.透射系统很难同时实现长焦距和像方远心.而采用反远型结构的透射系统较易同时实现像方远心和大视场.因此前置物镜采用反远型结构,选定全视场为 90° .由视场 90° 和像面高度200 mm计算得到焦距为100 mm.为了满足系统像方数值孔径小于或等于光纤传像束数值孔径,系统像方 F 数应大于等于2.5.理论上 F 数越小,光学系统通光能力和成像质量越好,因此选定前置物镜 F 数为3.通过以上分析,得到前置物镜光学系统的最终参量如表1所示.

表1 前置物镜系统参量

Table 1 Parameter of front front object lens

Parameter	Focal length	FOV	$F\#$
Value	100 mm	90°	3

前置物镜的设计结果如图4所示,采用反远型结构,共使用5片透镜,材料分别为硅、锗、硅、硅、锗.光阑设置在第三透镜的前表面上.前两片透镜为负透镜,主要用来减小边缘视场光线在后续光学元件上的入射角.系统中采用了3个非球面,分别为第3、9、10面.非球面主要用来实现像方远心和增大相对孔径.光学非球面的加工公差正比于工作波长,随着工作波长的增加,越易加工,红外波段的非球面加工公差较松.3个非球面均在锗材料透镜上,使用数控单点金刚石车削

技术,能够很好地满足准确度和控制成本.

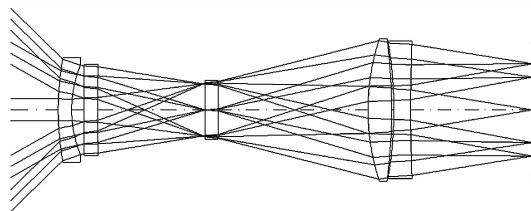


图4 前置物镜结构图

Fig. 4 Layout of front object lens

图5为前置物镜的调制传递函数.由图可知系统在光纤入射端Nyquist频率10 lp/mm处的MTF大于0.8,系统成像质量接近衍射极限.系统的边缘主光线像方远心度为 $28'$,满足指标要求.

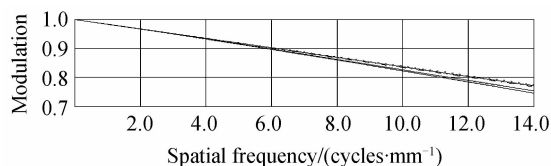


图5 前置物镜的调制传递函数

Fig. 5 MTF of front object lens

3 耦接镜设计

耦接镜的作用为将光纤传像束出射端的图像成像在红外探测器上.红外探测器采用法国 Sofradir 公司生产的 HgCdTe 制冷型探测器.该探测器焦平面规格为 320×256 元,像元尺寸为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$,焦平面尺寸为 $7.68 \times 9.6 \text{ mm}^2$,冷阑 F 数为2,冷阑到探测器距离为19.8 mm.光纤出射光束是充满其数值孔径成高斯分布发射的远心光束^[10],因此后继耦接镜的物方数值孔径必须大于光纤数值孔径,且耦接镜光学系统须为物方远心结构.

耦接镜的设计主要考虑以下几个问题:1)物方数值孔径大于或等于光纤的数值孔径;2)需将系统设计成物方远心结构;3)冷光阑匹配;4)由于系统所成的像是光纤束经过重排以后所得到的,为了后期将图像还原,要求控制畸变,且各视场像质均匀;5)为了便于装配,耦接镜的物距(光纤束与第一片透镜的距离)应不小于10 mm,耦接镜的最后一块透镜与探测器玻璃窗口的距离应不小于10 mm.

为了实现100%的冷光阑效率,耦接光学系统的光阑应置于探测器冷阑上,且满足冷阑 F 数为2.这样对光学系统的要求是出瞳距为-19.8 mm,像方 $F\#$ 为2.选定系统的放大率为-1,可得物方数值孔径为0.25,大于光纤的数值孔径.像面尺寸与物面相等,为 $8 \times 7.5 \text{ mm}^2$,对角线长11 mm,小于探测器尺寸.光阑放置在系统的后面,会使像差校正变的极为困难,还可能造成光学系统的口径过大,这是该系统设计的主要难点.通过以上分析,得到后继耦接光学系统的最终参

量如表 2 所示.

表 2 耦接镜系统参量

Table 2 Parameter of coupling lens

Parameter	Magnification	OBJ height	F #
Value	-1	11 mm	2

图 6 是耦接光学系统的设计结果. 该系统共使用了四片透镜, 分别为硅、硅、锗、硅. 该光学系统采用近似对称的 Cooke 三分离形式, 各面上的光线弯曲程度基本对称, 有利于像差的矫正. 锗透镜的后表面为非球面, 同样可以使用数控单点金刚石车削技术制造. 靠近物面的附近加一弯月形正透镜, 用以减小光束的发散角并改变光束的发散方向, 进而减小整个系统的口径, 同时弯月形透镜有利于校正系统场曲. 系统最后一面向前弯曲, 能减小冷反射.

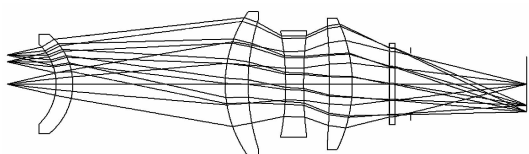


图 6 耦接镜结构图

Fig. 6 Layout of coupling lens

图 7 是耦接镜的调制传递函数. 由图可知该耦接镜在探测器 Nyquist 频率 17.7 lp/mm 处的 MTF 在 0.8 左右, 系统成像质量接近衍射极限. 系统各视场 MTF 基本相等满足各视场像质均匀的要求, 系统最大视场处的畸变为 0.95%, 满足图像还原的技术要求.

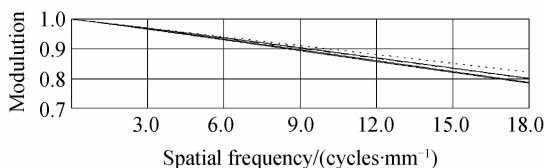


图 7 耦接镜的调制传递函数

Fig. 7 MTF of coupling lens

4 总体系统的 MTF

二次采样系统一般采用“平均传递函数”^[11-13]的方法来进行评价. 在平均传递函数的概念中, 整个系统的调制传递函数可由各分系统的调制传递函数表征. 因此, 对于本光纤传像系统, 级联系统可分为: 由前置望远系统组成的串联级; 由光纤传像束独立组成的串联级; 由后继耦接系统组成的串联级; 由 CCD 像元组成的离散采样系统. 因此整个系统的 MTF 可表示为

$$MTF_{sys} = MTF_{tel} \cdot MTF_{fib} \cdot MTF_{rel} \cdot MTF_{CCD} \quad (1)$$

式中, MTF_{sys} 表示系统总的 MTF, MTF_{tel} 表示前置望远系统的 MTF, MTF_{fib} 表示光纤传像束的 MTF, MTF_{rel} 表示后继耦接系统的 MTF, MTF_{CCD} 表示 CCD 探测器的 MTF. 在传统的连续介质成像系统中, 前后级联的两个光学系统的像差可进行相互补偿, 因此, 其

组合系统的 MTF 可能高于单个子系统的 MTF 之积. 这是因为前后镜组之间的过渡像面上的各个点不能看作独立的点光源, 它们有一部分是相干的. 然而, 对于光纤传像系统, 由于物镜和耦接镜间加入了光纤传像束, 使得原光束结构被打乱, 从而不存在原来的像差补偿. 这时, 前后光学系统的 MTF 符合 MTF 相乘律.

对光纤传像束, 由于单根光纤可看作是局域等晕的, 则光纤传像束可看作空间不变线性系统^[14]. 光纤传像束存在光纤纤芯的积分采样过程和各光纤密致排列的离散采样过程, 因此其传递函数可以表示为光纤积分传递函数 $MTF_{fib-int}$ 和光纤采样传递函数 $MTF_{fib-sam}$ 的乘积. 则光纤传像束调制传递函数 MTF_{fib} 可用下式计算

$$MTF_{fib} = MTF_{fib-int} \cdot MTF_{fib-sam} \quad (2)$$

光纤积分传递函数和光纤采样传递函数分别为圆形纤芯和方形像元的孔径函数的傅里叶变换, 即

$$MTF_{fib-int} = \left[\frac{2J_1(\pi d' f)}{\pi d' f} \right]^2 \quad (3)$$

$$MTF_{fib-sam} = |\text{sinc}(df)| \quad (4)$$

式中, J_1 为一阶第一类贝塞尔函数, d 为单根光纤半径, d' 为纤芯半径, f 为空间频率. 则光纤传像束的归一化平均传递函数为

$$MTF_{fib} = \left[\frac{2J_1(\pi d' f)}{\pi d' f} \right]^2 \cdot |\text{sinc}(df)| \quad (5)$$

光纤传像系统 CCD 第二次采样过程的平均光学传递函数的推导与光纤传像束第一次采样过程类似, 所不同的是二重采样孔径的积分窗口变为方形的 CCD 感光面, 采样函数为二维梳状函数. CCD 像元积分成像孔径窗口函数和像元间离散采样分布函数的傅里叶变换的乘积即为 CCD 自身的平均光学传递函数 (AOTF). 则 CCD 二次采样平均调制传递函数 MTF 是 AOTF 的模, 即

$$MTF_{CCD} = |\text{sinc}(2af)| \cdot |\text{sinc}(lf)| \quad (6)$$

式中, $2a$ 为 CCD 的像元尺寸, l 为 CCD 的像元间隔.

综上所述, 光纤传像系统的调制传递函数 MTF_{sys} 可表示为

$$MTF_{sys} = MTF_{tel} \cdot MTF_{fib} \cdot MTF_{rel} \cdot MTF_{CCD} =$$

$$MTF_{tel} \cdot MTF_{rel} \cdot \left[\frac{2J_1(\pi d' f)}{\pi d' f} \right]^2 \cdot$$

$$|\text{sinc}(df)| \cdot |\text{sinc}(2af)| \cdot |\text{sinc}(lf)| \quad (7)$$

本文选取的光纤传像束和 CCD 探测器参量为: 光纤纤芯尺寸 $d' = 45 \mu\text{m}$; 光纤间隔 $d = 50 \mu\text{m}$; CCD 像元尺寸 $2a = 25 \mu\text{m}$; 像元间隔 $l = 30 \mu\text{m}$. 将这些参量代入式(7), 在 MATLAB 中模拟整个光纤传像系统的传递函数, 其模拟结果如图 8 所示. 由图 8 可知, 根据平均传递函数的理论, 整个系统的 MTF 在 10 lp/mm 空间频率处的 MTF 大于 0.4, 成像质量满足航天红外成像系统质量要求.

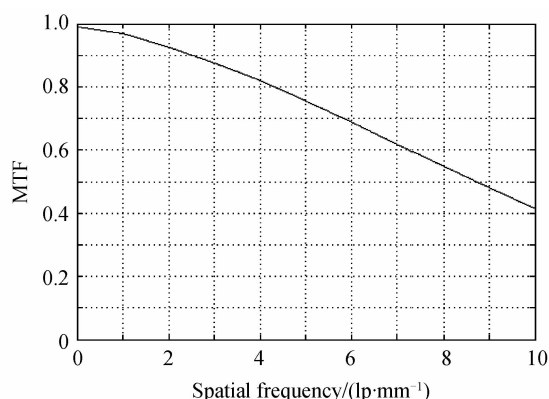


图8 整个系统的调制传递函数
Fig.8 MTF of total system

5 结论

本文主要介绍了基于线面转换的异型红外光纤传像束的推扫式红外光纤传像系统,该系统能够解决红外线阵探测器元数不足的问题.通过分析,证明该种光学系统设计难度大,前置系统要求大相对孔径、大视场和像方远心,耦接镜要求冷光阑匹配.针对一种入射端为 $4\,000\times 6$ 元线阵,出射端为 160×150 元面阵的红外光纤传像束,给出了具体的光学系统设计方法.文中光学系统的设计要求分析、设计思路和方法为该类红外光纤传像系统的设计和实现提供了参考.本文采用平均传递函数的理论对整个光纤传像系统的整体调制传递函数进行了理论模拟,模拟结果表明系统的MTF成像质量良好,说明该推扫式红外光纤传像系统具有很高的应用价值.

参考文献

- [1] YUAN Ji-jun. Review of infrared detector development[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(12): 1099-1102.
袁继俊. 红外探测器发展述评[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(12): 1099-1102.
- [2] LIU Zhao-jun, ZHOU Feng, LI Yu. Demands analysis of IR detectors for space remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 25-29.
刘兆军, 周峰, 李瑜. 航天光学遥感器对红外探测器的需求分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 25-29.
- [3] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] JOEL B, PATRICK P, DOMINIQUE B. Infrared pushbroom camera breadboard using off-the-shelf 2D array of detector[C]. SPIE 2209, Space Optics 1994; Earth Observation and Astronomy, 262.
- [5] ARNOLD D, TILL W L. Fiber-optically coupled infrared focal plane array system for use in missile warning receiver applications [C]. SPIE 3701, Infrared Imaging Systems; Design, Analysis, Modeling, and Testing X, 118.
- [6] AN Bo-wen, CHEN Gui-lin. Spatial transform in non-conventional ultra-high resolution image-carrying fiber bundles [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(11): 83-87.
安博文, 陈桂林. 超高分辨率异型传像光纤束中的空间变换[J]. *光电工程*, 2006, **33**(11): 83-87.
- [7] AN Bo-wen, CHEN Gui-lin. The nonuniformity correction in a system with fiber bundles coupling[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(5): 261-264.
安博文, 陈桂林. 光纤耦合系统中非均匀性校正[J]. *红外技术*, 2007, **29**(5): 261-264.
- [8] BOWEN A, BINGBIN X, SHENGDA P, *et al.* Sub-pixel processing for super-resolution scanning imaging system with fiber bundle coupling[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(8): 081001-1-4.
- [9] ZHU Xiang, FANG Zhong-hua, SUN Sheng-li. Fiber bundle coupling technique in optics system[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(5): 257-260.
朱翔, 方中华, 孙胜利. 光纤传像系统中的耦合技术研究[J]. *红外技术*, 2006, **28**(5): 257-260.
- [10] YAN Xing-tao, YANG Jian-feng, XUE Bin, *et al.* Design of the objective lens for endoscope with imaging fiber bundle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(2): 423-427.
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.
- [11] LI Dong-yuan, YAN Xiu-sheng, ZHANG Xiao-guang, *et al.* The receiving lens design of image guide fiber bundle[J]. *Laser & infrared*, 2005, **35**(9): 697-699.
李东源, 阎秀生, 张晓光, 等. 传像光纤束的物镜设计[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(9): 697-699.
- [12] WANG Hui, XIANG Yang, YU Bing-xi. Average modulation transfer function of line-array fiber-optic image bundles[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, **2**(8): 453-455.
- [13] CHENG Xin. The study on optical system of imaging fiber-optic spectrometer with wide field-of-view [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 78-90.
程欣. 大视场光纤成像光谱仪光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 78-90.
- [14] HE Xu, XIANG Yang. Study on a method of evaluating the alignment of pixels between fiber-optic image bundles and detector arrays[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(25): 189-193.
- [15] RENEE D. Optical transfer properties of fiber bundles[J]. *JOSA*, 1964, **54**(7): 907-915.