

透明光通信器件自动装配边缘检测技术研究

刘志强^{1,3}, 李永强¹, 唐玉春², 李传起^{1,4*}, 陆叶¹, 伍浩成³, 汤科³

(1. 广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 装备发展部军代局驻上海地区军代室, 上海 200437;

3. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004; 4. 南宁师范大学 物理与电子学院, 南宁 530001)

摘要: 针对透明光通信器件传统手工对准耗时长、成品率低和一致性差等问题, 通过研究透明光通信器件的自动装配要求, 建立透明光通信器件的边缘模型和耦合模型, 采用重叠积分法分析边缘误差对耦合损耗的影响, 设计了一种基于数字图像的透明光通信器件边缘检测方案。实验结果表明: 该方案能够很好地检测到复杂背景下透明光通信器件的边缘, 且能够满足对准偏差的精度要求, 为透明光通信器件全自动装配的智能对准系统研究提供支撑, 具有重要的工程应用意义。

关键词: 透明光通信器件; 光轴对准; 图像处理; 边缘检测

中图分类号: TP274 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2020)06-0036-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on edge detection technology of transparent optical communication device automatic assembly

LIU Zhiqiang^{1,3}, LI Yongqiang¹, TANG Yuchun², LI Chuanqi^{1,4*}, LU Ye¹, WU Haocheng³, TANG Ke³

(1. College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Military Agency of the Ministry of

Equipment Development stationed in Shanghai, Shanghai 200437, China; 3. The 34th Research Institute of CETC,

Guilin Guangxi 541004, China; 4. College of Physics and Electronic, Nanning Normal University, Nanning 530001, China)

Abstract: Aiming at the problems of traditional manual alignment time-consuming, low yield and poor consistency of transparent optical communication devices, the edge model and coupling model of transparent optical communication devices are established by studying the automatic assembly requirements of transparent optical communication devices. The influence of edge error on coupling loss is analyzed by overlapping integral method, and an edge detection of transparent optical communication devices based on digital image is designed programme. The experimental results show that the scheme can detect the edge of transparent optical communication device in complex background well, and can meet the accuracy requirements of alignment deviation. It provides support for the research of intelligent alignment system of automatic assembly of transparent optical communication device, and has important engineering application significance.

Key words: transparent optical communication device; optical axis alignment; image processing; edge detection

0 引言

光通信具有容量大、损耗低和保密性好等优点^[1], 得到了广泛应用。光通信设备包含类型各异的有源、

收稿日期: 2019-12-17。

基金项目: 广西科技重大专项计划广西创新驱动发展项目(桂科 AA18-118032)资助; 广西科技计划(桂科 AB17292082)资助。

作者简介: 刘志强(1972—), 男, 研究员, 广西壮族自治区光学学会理事。长期从事光纤通信技术和光纤激光技术的应用研究, 完成国家重大科技专项、预研等项目, 研制成果在国家重大工程和重大科技专项中获得推广应用。

* 通信作者: 李传起(E-mail: lcq@mailbox.gxnu.edu.cn)。



无源光通信器件, 而这些光通信器件由光纤、光波导或光学透镜等光学元件组成, 并需要高精度的有效对准装配, 以减少元器件间的耦合损耗, 提高耦合效率, 扩展环境适应性范围。随着技术的不断发展, 光通信器件必定向微型化、高集成化方向发展。由于光通信器件的体积很小, 如 1550 nm 波段的单模光纤纤芯直径只有 8~10 μm , 部分波导有效尺寸只有 2~3 μm , 所以光通信器件的对准精度一般要求在亚微米量级^[2]。光通信器件大部分为光学透明介质, 元器件边界定位偏差较大。目前, 光通信器件的装配仍以手动对准为主, 采用手工装配的器件成品率低、性能的一致性差、生产效率低且生产成本低, 无法满足日益增

长的光通信系统的需求。

光通信器件的自动对准方法可以分为主动式对准和被动式对准 2 种方式^[3,4]。主动对准方式需要向光通信器件注入一定波长的光,借助光功率计检测光路的输出功率,将测试光路的光功率作为反馈,引导各自由度找到损耗最小的对接状态,即光纤相对于光通信器件的最佳耦合位置^[5]。主动对准结构复杂且寻找最佳耦合位置耗时较长。被动对准方式无需借助光源,它是一种借助高精度导引机构即可完成对准的方法。被动对准的导引机构不具有通用性且对准精度很大程度上依赖高精度导引机构保证。近年来,机器视觉技术逐渐被引入光通信器件的对准耦合研究中,借助图像处理的方法,提取光纤和光通信器件的边缘特征直线,分析两者的位置关系,实现精准地快速物理对准^[6]。基于图像处理的对准技术具有方法简单、速度快、精度高和对物体无损伤等优点,符合自动对准的研究方向,得到了广泛的研究和应用^[7]。因此,本文设计一种基于数字图像的透明光通信器件自动装配边缘检测方案。

1 光通信器件的模型分析

由于光通信器件尺寸较小,材料多为透明介质,其表面多为镜面容易发生光的反射。在加工制造的过程中,光器件边缘不可避免产生相对粗糙的特征干扰,如器件中芯片的边缘、金属基底的边缘以及加工过程中的一些刻痕等,这些都将导致在自动装配图像识别过程中很难准确获取光通信器件的边缘特征。采用机器视觉对准最重要的是获取图像的边缘特征,因为边缘的精度影响整个对准系统的精度,所以分析光通信器件的边缘模型和对准模型显得尤为重要。

1.1 边缘模型

图像的边缘是灰度值发生剧烈变化的地方,这些变化一般是由物体的形状结构、表面反射及外部环境光照造成。常见的边缘模型有阶跃型和屋顶型:阶跃型边缘的两侧有变化剧烈的灰度值;屋顶型边缘的灰度值有明显的上升和下降的边界,其中灰度值上升或下降的速率与边缘的模糊程度有关。由于二维的光通信器件图像很难直观地反应边缘特征,所以本文将二维图像转化为三维的地形图,建立光通信器件的三维边缘模型,如图 1 所示。可以看出,光通信器件的边缘模型与屋顶边缘模型类似,因此可以使用屋顶边缘模型来分析光通信器件的边缘。此外,图像的边缘不是一条理想的直线,而且边缘的强度有强有弱;边缘的

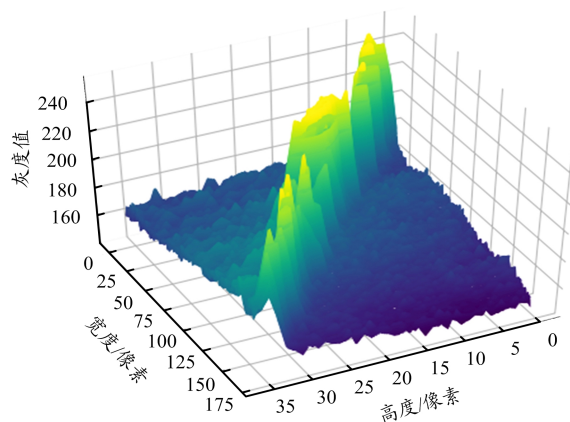


图 1 光通信器件三维边缘模型

宽度也不是理想的单个像素宽度。这是因为光通信器件多为硅或砷化镓反射率很强的类镜面,上面沉淀了一些粗糙的特征,这些因素都会对检测到的边缘造成干扰。

1.2 对准模型

光通信器件装配过程中,最常见的就是光纤与光器件的耦合对准,本文以光纤与光器件(铌酸锂晶体)的耦合对准为例说明。在实际的耦合对准过程中,光纤与光器件径向的偏离程度 r 、端面的间隙 d 和倾斜的角度 θ 都会影响系统的对准精度,如图 2 所示。如果对准系统光轴没有精确耦合,即入射光波与光纤端面会存在着对准误差。对准误差大致分为 3 种情况^[8,9]:轴向偏差、径向偏差和角度偏差。误差的存在将会引起激光信号能量的衰减,从而会导致光耦合效率的下降,直接影响到光通信器件产品装配的性能。

图 2 光纤和光通信器件对准模型

理想的耦合应该效率高并能获得尽可能大的输出光功率,以提高传输距离和提高系统的信噪比。经过理论分析可知,轴向误差减少 $1\ \mu\text{m}$,耦合效率大约提高 0.3%;径向偏差减少 $1\ \mu\text{m}$,耦合效率大约提高 9%;角度偏差减少 0.001° ,耦合效率大约提高 0.7%。通过比较轴向偏差和径向偏差可知,系统对径向偏差的要求要大于对轴向偏差的要求。

2 边缘误差对耦合损耗和耦合效率的影响分析

由光通信器件对准模型可知,使用边缘检测技术

装配过程中总会存在横向错位、纵向间距和角度偏离,从而产生轴向、径向和角度3种偏差。这3种偏差都会对光器件耦合效果产生影响。下面将具体分析因光通信器件边缘检测不准确导致的这3种偏差对光通信器件耦合损耗和耦合效率的影响。

2.1 轴向偏差对耦合损耗和耦合效率的影响

在光纤与光器件的连接处,由于两元件端面之间存在间隙,使光纤端面与光器件端面产生间隙 d ,从而引起的损耗叫端面间隙损耗,也称轴向偏差 Δd 。当存在轴向偏差 Δd 时的耦合损耗 α_d 可近似表示为^[8,11]:

$$\alpha_d = -10 \log \left(\frac{1}{1+d^2} \right) \quad (1)$$

其中, $d = \lambda \Delta d / (2\pi n_2 s_0^2)$, λ 为光波波长, n_2 为包层的折射率, s_0 为光纤的模斑半径。通过Python编程仿真可以得到轴向偏差 Δd 变化对于耦合损耗和耦合效率的影响曲线,如图3所示。可以看出,轴向偏差的增大会明显降低耦合效率,曲线呈单调递减趋势,耦合损耗会增加,曲线呈单调递增趋势,即随着轴向偏差增大,耦合损耗也增大。当轴向偏差大于 $50 \mu\text{m}$ 时,耦合效率小于0.85;当轴向偏差大于 $40 \mu\text{m}$ 时,耦合损耗大于0.5 dB。

2.2 径向偏差对耦合损耗和耦合效率的影响

耦合系统装配时,光纤端面与光器件端面的垂直方向会移动 Δr ,这种由两元件光轴横向错位引起的损耗叫错位损耗,也叫径向偏差。 Δr 是产生耦合损耗的重要原因。错位损耗 α_r 为^[8,11]:

$$\alpha_r = -10 \log e^{-\left(\Delta r/s_0\right)^2} \quad (2)$$

通过Python编程仿真可以得到径向偏差变化对于耦合效率和耦合损耗的影响曲线,如图4所示。可以看出,随着径向偏差的增大,耦合效率在快速下降,耦合损耗在快速增加。当径向偏差大于 $1.8 \mu\text{m}$ 时,耦合效率小于0.85,当径向偏差大于 $1.5 \mu\text{m}$ 时,耦合损耗大于0.5 dB。

对比图3和图4可以看出,相对于轴向偏差,两元件耦合效率对径向偏差的影响更为敏感,所以在装配耦合系统时,对径向对准的要求要更高一些。

2.3 角度偏差对耦合损耗和耦合效率的影响

在光纤与光器件的连接处,耦合系统装配会使两元件光轴角度倾斜 θ ,该倾斜角度引起的光功率损耗称为倾斜损耗,也称为角度偏差。其倾斜损耗 α_θ 表示为^[8,11]:

$$\alpha_\theta = -10 \log e^{-\left(\pi n_2 s_0 \theta / \lambda\right)^2} \quad (3)$$

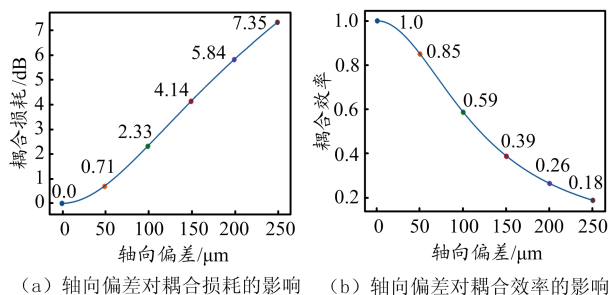


图3 轴向偏差对耦合损耗和耦合效率的影响

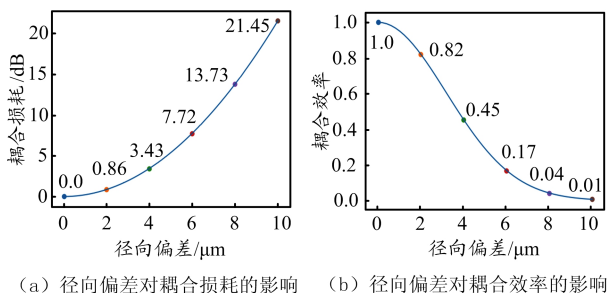


图4 径向偏差对耦合效率和耦合损耗的影响

通过Python编程仿真可以得到角度偏差变化对于耦合效率和耦合损耗的影响曲线,如图5所示。可以看出,随着角度偏差的增大,耦合效率在快速下降,耦合损耗在快速增加。当角度偏差大于 0.025° 时,耦合效率小于0.87,耦合损耗大于0.47 dB。此外,耦合损耗对角度偏差非常敏感,当角度偏差大于 0.1° 时,耦合损耗高达7.56 dB,因此角度偏差对装配精度要求非常高。

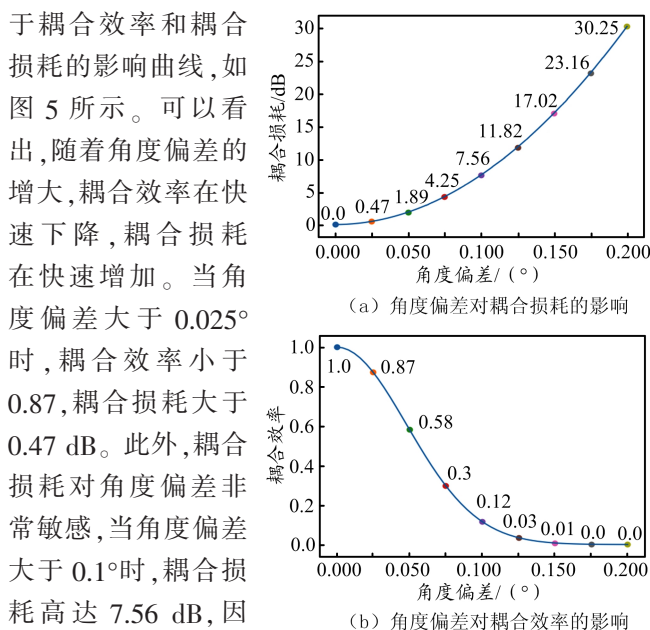


图5 角度偏差对耦合效率和耦合损耗的影响

3 光通信器件边缘检测

3.1 实验平台

本文分析光通信器件的边缘模型和耦合模型后,采用一套图像采集系统进行实验,如图6所示。装配的光通信器件为铌酸锂调制器,调制器的光学部分由2条光纤和1个铌酸锂晶体组成,2条光纤分别耦合

在铌酸锂晶体的两端作为光的输入和输出。利用远心镜头和互补金属氧化物半导体(CMOS)工业相机在器件正上方采集俯视图像,然后将采集到的图

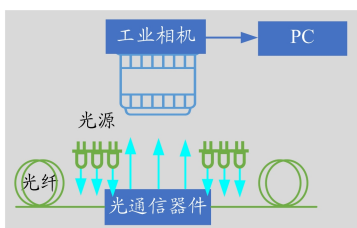


图6 图像采集系统

像数据通过USB接口传送到计算机(PC)。由于铌酸锂晶体的外形尺寸宽度约为3 mm,高度约为1 mm,而耦合部位的有效尺寸约为8 μm ,耦合损耗小于0.2 dB,工业相机的分辨率至少要求400万(2000(H)×2000(V)),所以本实验平台的CMOS工业相机采用大恒图像水星系列的MER-503-36U3M-L,分辨率为2448(H)×2048(V);远心镜头采用MORITEX公司的MML05-HR65DVI-5M镜头,其靶面尺寸2/3"。

3.2 实验过程

对于屋顶型边缘,有多种方法获取光通信器件边缘,如微分算子、图像形态学梯度和霍夫变换等。不论哪种方法在获取边缘之前都必须对图像进行预处理,滤除干扰。

3.2.1 图像预处理

光通信器件的对准实验的关键是准确地找到光通信器件的边缘,但由于光通信器件是透明的,边缘锐度模糊,直接使用边缘检测手段检测边缘效果不佳,所以必须要对图像进行图像增强。目前,图像增强没有通用的理论,在选择图像增强算法时,往往是基于图像的特征。本文结合透明光通信器件图像的特点选择局部拉普拉斯金字塔算法,对采集到的原始图像进行增强。从实验的结果可知,局部拉普拉斯金字塔可以有效地保留图像的边缘。

由于使用的相机像素很高,对于高像素的图像在边缘检测前要进行滤波,去除掉噪声,使结果更加准确。均值滤波和高斯滤波在去除噪声的同时也会模糊细节信息。而双边滤波器不仅考虑了邻域内像素的空间距离,还考虑了邻域内像素的灰度差,这样可以起到保护边缘、去除噪声目的。

考虑到本文是检测图像的边缘,要尽量多地过滤掉高像素图像的噪声,同时还要保护图像的边缘,以防边缘丢失导致检测不到边缘,所以本文选择双边滤波器对图像进行滤波,其公式为:

$$w(x,y)=\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_d^2}-\frac{r(x,y)^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (4)$$

其中, σ_d 为距离标准差; σ_r 表示颜色标准差; $r(x,y)$ 为在点 (x,y) 处的灰度值。

3.2.2 粗检测边缘

Canny边缘检测算法满足信噪比准则、定位精度准则和单边缘响应准则^[12],目前它是一种最佳的边缘检测算子,所以本文采用Canny边缘检测算法对预处理后的图像进行边缘检测。由于目标图片包含有太多的对象,如果阈值太大,干扰减少,轮廓会消失;如果阈值太小,干扰会相应地增加。经过分析图像的特征,本文选择了一个合适的阈值,然后构造直线边缘检测结构元素,有效地提取图像中的水平直线和竖直直线。

由构造的边缘检测结构元素提取到的直线是不连续的,而且一些干扰直线也会被检测到(但是干扰直线的长度要明显小于轮廓直线),本文采用图像形态学中的膨胀算法将不连续的轮廓连接起来,然后进行轮廓检测,通过设定合适的阈值将干扰直线滤除掉。

3.2.3 精检测边缘

经过轮廓检测到的直线有明显锯齿现象,所以考虑使用直线拟合的方法提高精度,最小二乘法是最常用的直线拟合方法。但是,最小二乘法有一个最大的问题是当噪声点远离直线时,一个噪声点可能会导致整个拟合线发生偏移。考虑到噪声的存在会干扰直线的拟合,本文在最小二乘法的基础上加上一个权重,权重的取值反比于点到拟合直线的距离,这种方法称为加权最小二乘法。

4 结果验证

4.1 准确性验证

为了验证上述边缘检测的准确性,本文根据根据CCD光学成像模型,生成几何中心位于图像中心的20幅大小不一、带有任意旋转角度的几何图像。角度偏差和耦合损耗分析如表1所示。由表1可知,耦合损耗对角度偏差非常敏感,所以本文利用算法检测图像中的角度,通过Python编程计算结果,由此来验证是否满足准确性的要求。

图7为20幅图像的角度偏差,平均角度误差为0.0113°,经计算平均耦合损耗为0.1222 dB。可以看出,角度偏差的标准差趋于稳定,证实本文算法具有较好的准确性。

表1 角度偏差和耦合损耗分析

序号	角度偏差/(°)	耦合损耗/dB	序号	角度偏差/(°)	耦合损耗/dB
1	0.021	0.333	11	0.012	0.109
2	0.005	0.018	12	0.005	0.018
3	0.002	0.003	13	0.019	0.273
4	0.008	0.048	14	0.002	0.003
5	0.019	0.273	15	0.018	0.245
6	0.003	0.006	16	0.010	0.075
7	0.008	0.048	17	0.011	0.091
8	0.016	0.193	18	0.018	0.245
9	0.013	0.127	19	0.010	0.075
10	0.015	0.17	20	0.011	0.091

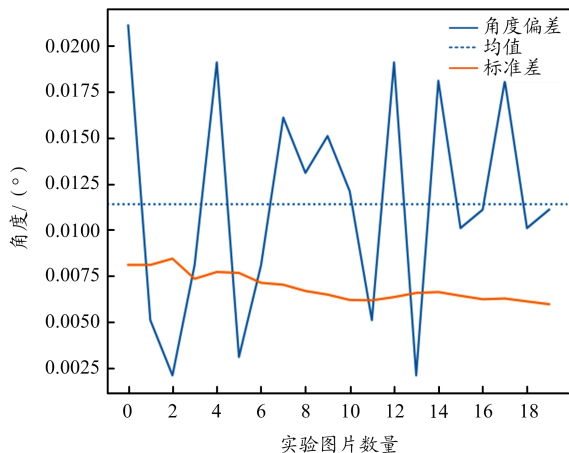


图7 角度偏差

表2 精确性比较

序号	像素误差		序号	像素误差	
	Canny 算法	本文算法		Canny 算法	本文算法
1	0.36	0.0	11	0.82	0.31
2	0.7	0.22	12	0.2	0.3
3	0.3	0.21	13	0.1	0.2
4	0.8	0.29	14	0.5	0.2
5	0.2	0.31	15	0.5	0.21
6	0.1	0.0	16	0.64	0.22
7	0.4	0.30	17	0.3	0.5
8	0.4	0.30	18	0.85	0.5
9	0.7	0.29	19	0.2	0.5
10	0.4	0.0	20	0.2	0.5

4.2 精确性验证

对 20 幅图像边缘检测后,本文使用 Harris 角点检测算法检测 20 幅图像的角点,精确性比较情况如表 2 所示。然后,通过 Python 编程测量角点的精度来验证算法的精确性。

经过计算,传统 Canny 算法平均像素误差为 0.43,而本文算法的平均像素误差为 0.27。本文采用的镜头倍率为 0.5x,如果不考虑相机畸变,Canny 算法的平均物理误差为 1.48 μm ,而本文算法的平均物理误差为 0.93 μm 。由此可知,与传统 Canny 边缘检测算法相比,本文算法检测的误差较小,能够尽可能地满足光纤对定位精度的需求。

5 结束语

针对复杂背景下的透明光通信器件的边缘检测问题,本文详细研究了透明光通信器件的边缘模型和对准模型,深入分析边缘误差对耦合损耗和耦合效率的影响。设计了透明光通信器件表面图像采集系统,提出了一套边缘粗检测和边缘精检测相结合的检测方法,对检测结果进行了准确性和精确性的验证。实验表明:使用本文的边缘检测方法能够快速准确地检测出光通信器件的轮廓,能够满足自动对准系统对边缘检测的需求。若进一步提升实验平台工业相机的分辨率和镜头的放大倍率等性能指标,耦合对准的精度还能进一步提升。

参考文献:

- [1] 张欣然. 浅谈现代光纤通信传输技术应用[J]. 数字通信世界, 2018, 157(1): 146-240.
- [2] 马慧莲,杨建义,李瑾,等. 光波导-单模光纤的直接耦合[J]. 光通信研究, 2000(3): 45-49.
- [3] 李颖. 光纤—光波导自动耦合技术控制系统的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [4] 魏丽,郭玉静,陆向宁. 基于 Hough 变换的高精度机器视觉对准系统的研究[J]. 应用光学, 2017(6): 35-40.
- [5] TSENG C Y, WANG J P. Automation of multi-degree-of-freedom fiber-optic alignment using a modified simplex method [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(10): 1109-1119.
- [6] 吕文,郑煜,王丽军,等. 光波导器件边缘的高精度直线检测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017(7): 1734-1740.
- [7] 房启蒙,冯迪,于文海,等. 基于图像的保偏光纤尾纤定位技术[J]. 光电子技术, 2018, 38(2): 14-19, 26.
- [8] MARCUSE D. Loss Analysis of Single-Mode Fiber Splices[J]. The Bell System technical journal, 1977, 56(5): 703-718.
- [9] 郭华春,姚志,任俊鹏,等. 单通道光纤旋转连接器内部耦合损耗的分配优化设计研究[J]. 西安航空学院学报, 2018, 36(5): 84-88.
- [10] 李亮,宋凝芳,冯迪,等. 基于数字图像的保偏光纤与 Y 型波导耦合损耗分析[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 225-231.
- [11] 廖延彪. 光纤光学 [M]. 第 1 版. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [12] CANNY J. A Computational Approach To Edge Detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 679-698.