

文章编号:1007-1180(2010)12-0028-05

# 光学系统中的光纤传像束

李桂菊, 王延杰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 光纤传像束是一种可任意弯曲的传输图像的无源器件。与传统的光学成像器件相比, 它具有重量轻、使用自由度大、易实现复杂空间结构的图像传递等优点, 被广泛地应用于医学、工业及科研、航天、军事等多种领域。本文介绍了光纤传像束的原理, 在医疗、工业及国防安全等领域的应用以及国内外研究状况。

**关键词:** 光纤传像束; 可任意弯曲; 内窥镜; 光学系统

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20102712.0028

## Optical Fiber Bundle in Optical Systems

LI Gui-ju, WANG Yan-jie

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Optical fiber bundles (OFB) are flexible passive devices used for transmitting pictures. Compared to the traditional optical imaging devices, they have virtues such as light weight, more dimensions and easier to transmit images in complex spatial structures. Therefore, the OFB can be widely used in many fields, such as medical care, industry, researches, aviation and military etc. The principle of OFB, the applications in medicine, industry, military and the recent research progress in OFB are introduced in this paper.

**Keywords:** optical fiber bundles; arbitrarily bended; endoscope; optical system

### 1 引言

纤维光学是近几十年来从近代光学领域发展起

来的一门分支学科, 它是研究光波在透明光学纤维中的传输机理、光纤元件的性能、制造工艺、测试以及各种光纤应用技术的学科。近年来, 纤维光学技术

\*基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 60977062, 61027010) 资助项目

已在光的传递和视觉信息的传递等诸多领域中得到了广泛的应用。光纤传像束作为一种典型的纤维光学元件,将多根一定长度的光纤有规则地集集成束以实现图像的传递,是一种可任意弯曲的传输图像的无源器件。由于其特有的不可替代的特性,光纤传像束被广泛应用于医学、工业、科研、军事等众多领域<sup>[1-2]</sup>。

## 2 光纤传像束的原理

图1为光纤传像束原理示意图。在使用时,通过光学物镜把目标成像于传像束的端面上,该端面上的图像可以看作是由许多亮度不等的像元组成的。每根光纤都有良好的光学绝缘性能,即其独立传光面不受邻近其他光纤的影响。因此,光纤的传光面(即光纤芯层)就可看作是一个取样孔,在独立的传光过程中携带着一个像元。像元的大小为取样孔的大小,像元的数目等于端面上光纤的根数。传像束两端必须是相关排列、一一对应的,即要求每根光纤在传像束的入射端面 and 出射端面上的几何位置完全一致,因此出射图像和入射图像基本一致。当传像束的一个端面上有一定的光能分布(即图像)时,在传像束的另一端便生成该图像的镜像<sup>[3-4]</sup>。

光纤传像束的两端需要胶合起来,中间部分可以是松散的,所以可以沿着弯曲的路径传递图像,这是普通光学系统难以实现的。然而,光纤传像束要求做严格的相关排列,并且要有极高的排丝密集度,这就造成工艺制造技术难度大和成本高的双重困难。特别是在大截面光纤传像束的制造上,由于制造工艺难度的限制,生产高质量的大截面光纤传

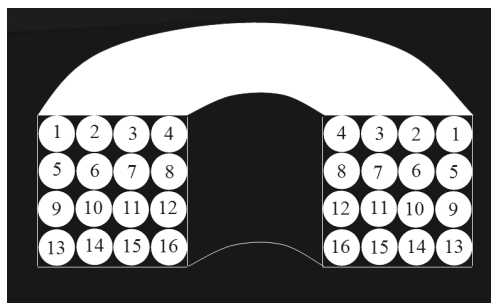


图1 光纤传像束原理示意图

像束的成品率较低。尤其是生产过程中所形成的断丝、暗丝、错位以及叠层的不均匀,都对其传输图像质量有十分明显的影响。另外,由于光纤传像束传像机理的限制,在输出图像的背景中附加了光纤传像束的网格结构,也导致了图像像质降低<sup>[5]</sup>。所以,目前在应用过程中,很多都是通过采用波分复用技术来提高图像质量,以弥补图像像质降低的缺陷。

## 3 光纤传像束的应用领域

### 3.1 医学领域

光纤传像束最早是在医学及工业检测领域中获得应用的。以光纤传像束为关键核心部件制成的医用内窥镜在医疗上的成功应用带来了医疗手段的革命。1868年,喀斯摩(Kussmaul)首先将胃镜用于人体。此后,人们陆续把透镜系统和棱镜系统的硬性或软性内窥镜用于人体的许多部位。目前,由于光纤内窥镜所具有的特点,以及细径光纤内窥镜的产品化,医疗诊断光纤内窥镜已成为理想的医学诊断治疗工具。例如,血管内窥镜作为传统的血管造影术的一个极好补充,给对造影术过敏的人群带来了福音;利用颅内窥镜,不用开颅,只需在颅骨上打一小孔即可进行脑肿瘤切除手术;用脊髓内窥镜,可检查和诊断非感染性严重蛛网膜炎,还可用于肝脏、肾脏及肌肉的诊断;用胰腺内窥镜可进行胰腺癌和胰腺疾病的早期诊断;用眼内窥镜可治疗视网膜剥离症等等。几乎所有人体管道和腔道均有相应的内窥镜,如支气管镜、胆道镜、子宫镜、咽喉镜和鼻窦内镜等,同时还可应用于开放性手术治疗<sup>[6]</sup>。

### 3.2 工业领域

光纤工业内窥镜的应用涉及了化工、电力、汽车、飞机、压力容器、建筑等领域。例如,可采用光纤工业内窥镜监测锅炉火焰燃烧状况,使监控获得的信息提高了4个数量级,不仅能判断火焰的稳定性,还能识别火焰形状,保证了电站锅炉的安全燃烧;光纤内窥镜在检查锅炉、汽轮机、变压器等电气设备的损伤或腐蚀及查找掉落的物体等方面效果

也很明显;此外,光纤内窥镜还可用于检查发动机、变速箱、消声器、燃料管的磨损、积碳、堵塞等情况,在汽修行业得到广泛的应用。例如,用内窥镜观察得到发动机清洗前后的图像并进行比较,可以对清洗效果有一个直观的了解。在汽车生产中,采用内窥镜进行无损检测,使每个生产批次的每一台发动机都可以得到检查,从而保证了质量,降低了成本<sup>[6]</sup>。

### 3.3 军事及安全领域

光纤传像束以其重量轻、柔软、抗辐射、耐高低温等优点,被应用于军事领域的许多部门。例如,军用侦察潜望镜要求能远距离发现目标并分辨目标。柔性光纤传像束潜望镜可利用波分复用技术消除光纤传像束的网格现象以及断丝对图像质量的影响,系统分辨率可达到 60 lp/mm,满足野战部队 3 km 发现车辆、1 km 内发现人员活动的要求<sup>[4]</sup>。

为适应反恐、反劫持人质等要求,人们研发了光纤传像-红点瞄准镜<sup>[7]</sup>。利用光纤传像系统的柔性与潜望功能,射手可在近距离受到敌方严重杀伤威胁的条件下,有效地隐蔽自己并快速瞄准射击以制胜敌人。

为保证社会安定和打击罪犯,公安人员所使用的侦察破案手段越来越趋于高科技化。南京玻纤院研制的传像内窥镜在毒品走私缉查中有效地检查出封闭腔内的隐藏物,取代了进口产品<sup>[6]</sup>。

## 4 光纤传像束的国内外相关研究状况

利用光纤传像束传输图像的研究历史比较长,早在 20 世纪二、三十年代,英国人 J L Baird 和德国人 H Larm 就提出有关利用光的全反射原理把柔软的光纤集成束传输光学图像的设想。这种方法理论上简单方便,但实现起来并不容易,原因就在于拉制出相关排列的光纤传像束需要解决许多工艺上的困难。直到 1954 年,才首先由美国人 H.H.Hopkins 与 N.S.Kapany 研制出可实用的相关光学纤维束——光纤传像束,发表了利用传像束传输图像的报告,

并在之后将其成功地应用于医疗内窥镜中。1955 年,荷兰人范希尔 (Van Heel) 与勃劳伟 (W·Brouwer) 发表了利用纤维束分解和再现文字的报告<sup>[8]</sup>。进入 60 年代以后,美国又将光纤传像束应用于军事上,并逐渐奠定了产业化的基础。英国、德国、前苏联、日本等国家也随后相继开展这方面的研制工作。

1998 年,日本国立天文台发表了光纤传像束的一种新应用,将其作为长线列光纤图像分割器应用于光谱仪中,将长线列光纤传像束作为光谱仪中的光瞳分割器来转换光束形状和聚焦比率,从而将望远镜在焦平面所成的像传输到光谱仪的入射狭缝。这种应用还可以提高光谱仪的信息处理能力和分辨率<sup>[9]</sup>。2002 年,英国科学家利用线列光纤传像束研制出了能成高空间解析率全色像的宽视场超光谱成像仪<sup>[10]</sup>。2004 年,宾夕法尼亚州立大学和美国空间科学研究中心联合报道了将光纤传像束作为与陆地行星探测器 (TPF) 中透镜阵列耦合的器件,以此来更好地消除 TPF 中的望远系统和干涉仪由于对准不理想而产生的光线泄漏<sup>[11]</sup>。

我国于上世纪 80 年代初期和中期分别研制出可以实用化的小截面和大截面光纤传像束。目前,制作光纤传像束产品的主要有南京玻纤院、北京玻璃研究院等。此外,长春理工大学采用酸溶法工艺所研制了“高性能柔性传像束”,具有单丝直径细、分辨率高、数值孔径大、柔性好等优点<sup>[12]</sup>。中科院长春光机所研制了“高精度长线列光纤图像分割器”,作为一种高精度的线面转换传像束,以其高精度的特点可广泛应用于工业、医学、军事及航空航天等领域中<sup>[13-15]</sup>。

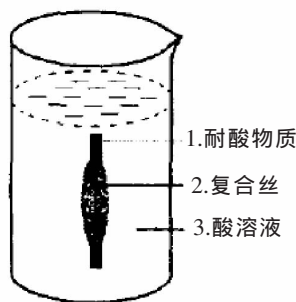


图2 酸溶工艺示意图

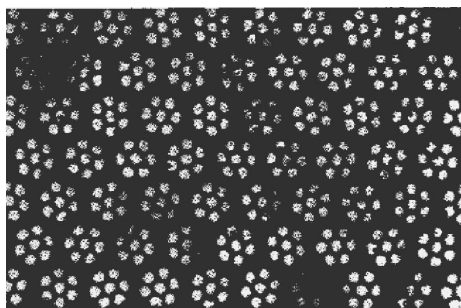


图3 复丝结构构成的传像束端面照片<sup>[16]</sup>

2010年,南京春辉科技实业有限公司结合层叠法与复丝法的优点,采用玻璃管结构,同时填充EMA纤维,制成了高分辨率大信息量的光纤传像束。通过试验已经制造出3根传像束,具体规格为13.5 mm(截面)×600 mm(长度),光纤单丝量达120万,分辨率 $\geq 50$  lp/mm<sup>[16]</sup>。

随着CCD成像技术和大截面光纤传像束技术的发展,在某些特殊的应用场合(例如对特定激光信号进行探测),为了保证系统具有较高的探测距离和定位精度,采用了大截面光纤传像束,对传像束前置光学系统的成像质量和通光口径提出了更高的要求。燕山大学和东北电子技术研究所在大截面传像束前置光学系统设计中,采用“负-正”型式的像方远心光路结构,在像差校正过程中引入标准二次曲面和偶次非球面,能很好地解决镜头轴外像差校正与像面照度均匀性问题,同时使镜头结构紧凑、小型化。通过理论计算和ZEMAX光学软件的优化,给出工作波长0.8~1.1  $\mu\text{m}$ 、焦距5 mm、相对孔径为1:3.8、光学长度为47.5 mm、视场角为60°的镜头设计实例。对设计结果的分析表明,该镜头在31 lp/mm空间频

率处的MTF值超过0.78<sup>[17]</sup>。

重庆大学通信工程学院针对实现二维仿射变换的光学方法进行了研究。鉴于采用道威棱镜、反射镜和缩放透镜实现光学仿射变换具有调节困难、精度低、灵活性差和稳定性差等缺点,提出了基于光纤传像束和MEMS(微机电系统)光交叉连接的方法克服上述问题。通过利用MEMS光交叉连接可以实现任意端口间的交换特性,与光纤传像束结合能够用光学方法实现任意仿射变换。光学实验与数字仿真实验的对比证实了该方法的优越性<sup>[18]</sup>。

光纤传像束出厂前需要进行质量检测,研究者提出了一种鉴定断丝率指标的自动检测方法<sup>[19]</sup>。将一束均匀的平行白光注入光纤传像束输入端,在输出端成像于高分辨率数码相机的CCD面阵上,采集的检测图像传输到计算机中。利用图像预处理和模糊平均方法,通过自适应阈值比较,标识出光纤传像束断丝像点的大体位置,然后以最短欧氏距离为判据,采用系统聚类法对断丝像点进行聚类 and 识别,统计出断丝数和断丝率。该图像处理算法可以克服传像束胶缝暗纹的干扰,具有计算量小、可靠性高的优点,能够快速地对光纤传像束进行质量评估和综合鉴定。

## 5 结束语

在光电子技术日益发展的今天,光纤传像束的研究越来越深入和广泛,内容涉及制造、检测、可靠性以及应用等诸多方面。光纤传像束以其自身的优点将在医疗、工业军事、航天探测等领域发挥越来越重要的作用。

## 参考文献

- [1] 陈月存,唐勇. 光纤传像束的物镜设计[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 110-113.
- [2] 李响,梁中翥,郭鹏,等. 光纤传像束研究进展[J]. 光机电信息, 2009, 26(7): 24-31.
- [3] 徐大雄. 纤维光学的物理基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984: 81-83.
- [4] 侯凤杰. 线列光纤传像束的设计及制作技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士学位论文, 2007.

- [5] 王慧. 线列光纤图像分割器的调制传递函数研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位论文, 2005.
- [6] 马相路. 光纤传像束原理及其应用[J]. 光机电信息, 2007, 24(10): 44-49.
- [7] 迟泽英, 陈文建, 李武森, 等. 无源光纤传像技术军事应用研究[C]. 全国第十二次光纤通信暨第十三届集成光学学术会议论文集, 广东四会, 2005: 854-859;
- [8] 长尾和美. 光导纤维[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1980: 1-3, 148-149.
- [9] Iye M, Ebizuka N, Takami H. Fiber pupil slicer - A versatile light feed for spectrographs [J]. *SPIE*, 2002, 3355: 417-423.
- [10] Fletcher-Holmes D W, Harvey A R. A snapshot foveal hyperspectral imager[J]. *SPIE*, 2002, 4816: 407-414.
- [11] Ge Jian, McDavitt D, Miller S. Development of an extremely coherent single mode fiber bundle array for high contrast imaging of extrasolar planets with visible Terrestrial Planet Finder[J]. *SPIE*, 2004, 5491: 628-635.
- [12] 于凤霞, 周德春, 关锡彬, 等. 酸溶法光纤传像束酸溶工艺的研究[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 141-144.
- [13] 郭鹏, 梁静秋, 朱艳青, 等. 光纤图像分割器的透过率分析与测试[J]. 光电子技术, 2008, 28(2): 93-96.
- [14] Liang Jingqiu, Guo Peng, Liang Zhongzhu, *et al.* Manufacturing and testing of the line-array fiber-optic image slicer based on silicon V-grooves[J]. *SPIE*, 2007, 6836: 683607-1-683607-9.
- [15] 梁静秋, 候凤杰. 采用硅 V 型槽的一维光纤阵列的研制[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1): 90-94.
- [16] 张振远, 徐明泉, 李莉, 等. 一种高分辨率大信息量光纤传像束的制造工艺试验[J]. 玻璃纤维, 2010(2): 28-31.
- [17] 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.
- [18] 田逢春, 李显利, 陈建军, 等. 基于微机电系统光交叉连接的光学仿射变换[J]. 光电子技术, 2010, 30(2): 88-93.
- [19] 陈前荣, 沈英春. 光纤传像束断丝率的自动检测[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2007(5): 13-16.

作者简介: 李桂菊(1964-), 女, 汉族, 吉林吉林人, 研究员, 主要从事图像处理系统的研制开发工作。

E-mail: lgjciom666@yahoo.com.cn