

文章编号: 1002-1582(2025)06-0724-05

基于激光切割的V型结构光纤漏水传感器性能研究

侯钰龙*, 王欢, 卢春霖, 苑佳馨, 张彦军

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对多源准分布式光纤漏水传感器侧向耦合结构损耗大、精度低等问题, 选用激光切割机在光纤上加工V型槽结构, 提高结构的精度。选用不同激光功率与加工角度, 对V型结构进行测试, 通过对比传输损耗以及耦合效率, 确定激光功率为20%以及加工角度为45°时具有0.2dB较低的损耗, 且漏水状态下耦合结构有51%脉冲强度变化。实验结果表明, 倾斜V型结构比垂直V型结构相比, 传输损耗基本一致, 但耦合效率以及漏水状态下脉冲强度具有明显优势, 能够在漏水状态下进行有效检测。

关 键 词: 侧向耦合; 光纤传感; V型结构; 漏水检测

中图分类号: TP212; TH691.9

文献标识码: A

Study on the performance of V-shaped optical fiber water leakage sensors based on laser cutting

HOU Yulong*, WANG Huan, LU Chunlin, YUAN Jiaxin, ZHANG Yanjun

(State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of high loss and low accuracy of the lateral coupling structure of the multi-source distributed optical fiber water leakage sensor, a laser cutting machine is selected to process the V-shaped groove structure on the optical fiber to improve the accuracy of the structure. Different laser powers and processing angles were selected to test the V-shaped structure. By comparing the transmission loss and coupling efficiency, it was determined that when the laser power was 20% and the processing Angle was 45°, there was a lower loss of 0.2dB, and the coupling structure had a 51% pulse intensity change in the leakage state. The experimental results show that, compared with the vertical V-shaped structure, the inclined V-shaped structure has basically the same transmission loss, but it has obvious advantages in coupling efficiency and pulse intensity in the leakage state, and can conduct effective detection in the leakage state.

Keywords: side coupling; fiber optic sensing; V-shaped structures; liquid leakage measurement

0 引 言

漏水问题普遍存在, 它不仅造成珍贵水资源的无谓流失, 还可能危及建筑物的安全稳定, 并进一步对环境构成污染风险。鉴于此, 漏水检测技术的研发与推进显得愈发关键。随着物联网、人工智能及大数据等前沿技术的不断进步, 漏水检测手段

将趋向于更高的智能化与自动化水平。通过将传感器网络与大数据分析相结合, 可以实现对建筑物或管道系统的实时监控, 提前预警潜在的漏水风险。

光纤漏水监测是一种利用光纤传感技术来检测漏水情况的方法, 它基于光纤对特定物理量的敏感特性, 通过采集光纤中光强的变化来实现对漏水的实时检测和定位^[1-3]。大多数光纤式液体泄

收稿日期: 2025-06-06; 收到修改稿日期: 2025-07-13

基金项目: 山西省应用基础研究计划 (202103021224211)

作者简介: 侯钰龙 (1984—), 男, 高级实验师, 博士, 从事光纤传感器研究。

* 通讯作者: houyulongnuc@163.com

漏检测技术的核心原理在于利用光纤的散射特性,具体涵盖拉曼散射、布里渊散射及瑞利散射等机制^[4-8]。光学频域反射技术被应用于远距离的探测场景中,但遗憾的是,将液体泄漏事件转化为温度或应变变化的过程颇为耗时,从而限制了系统的即时响应能力。当前有研究团队提出了一种基于光纤多源扫描定位的准分布式漏水传感器,该传感器基于光纤侧向耦合效应,通过缺陷耦合结构与LED灯带之间的传输介质变化实时反映漏水情况,结构简单且响应速度快,通过在光纤上加工锥体、光栅等特殊结构,可以提高传感器的测量精度,反映折射率的变化。然而,这种结构加工比较复杂,增加了成本。

因此,研究发现一种经济有效的侧向耦合方法,在多模光纤上加工孔形圆锥缺陷耦合结构,通过介质缺陷耦合结构的变化来反映泄漏事件^[9,10]。准分布式光纤漏水传感器正是利用这种模式进行漏水监测,兼具抗干扰性强、易于布设维护、实时监测及长距离传输等优势,使得准分布式光纤传感器在漏水监测领域具有独特的应用价值。

本文提出了一种具有V型缺陷耦合结构的聚合物光纤(POF)泄漏传感器。通过切除包层以及部分纤芯的方法,或破坏包层模及传导模,来达到光泄露的目的^[11]。同时进行多点耦合的方法对光纤进行处理,可以实现多点液位测量。该传感器由LED柔性灯带和POF光纤以及光功率计构成,搭建平台简单,测量便捷。由于泄漏液体的折射率与V型槽深度会对光功率计的输出信号产生影响。在漏水事件当中,当V型槽深度较大时,光功率计接收到的信号会增强,但这种方式加工出的光纤损耗过高,会导致测量距离减小。因此对V型结构进行改善。

为解决上述问题,对光纤侧向耦合结构进行改进,利用激光切割机对光纤进行不同光功率及角度的V型加工,使得整个系统有更高的耦合效率和更低的插入损耗,延长测量范围,提高系统的精度,对光纤检测在漏水监测中至关重要。

1 基本原理

本文使用一种多源扫描定位技术的光纤传感方式,主要的给光方式是在耦合结构正上方放置光源,两端输出光强。最后将信号传输到数据用户界面,便于实时监测^[12,13]。图1所示为所提出的光纤侧向漏液监测系统的剖面结构。

假设空气或其他液体、光纤纤芯的折射率分别为 n_1 、 n_2 ,耦合区域为空气或液体时折射率为 n_1 ,光纤纤芯和光纤包层的折射率基本一致为 n_2 。

LED发出的光线通过空气界面耦合到POF光纤中,当有液体进入耦合区域时,耦合区域的折射率 n_1 将会发生改变,通过耦合区域进入光纤中的光线路径也会随之改变,折射角由 θ_2 增大为 θ_3 。当耦合区域由空气($n=1.00$)变为漏液(如水, $n=1.33$)时,根据斯涅耳定律

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \quad (1)$$

$$\alpha_{c1} = \sin^{-1} n_2 / n_1 \quad (2)$$

当耦合区域由空气变成水时 n_1 增大,折射角 θ_2 就增加到 θ_3 ,进入光纤内的入射角变小,当入射角小于 α_{c1} 时,因部分光线不满足全内反射,光纤内传导模式总功率减少。结果表明,随着耦合介质折射率的增加,光纤传导模式总功率减小,同时通过监测光纤端面的光功率变化也在降低。

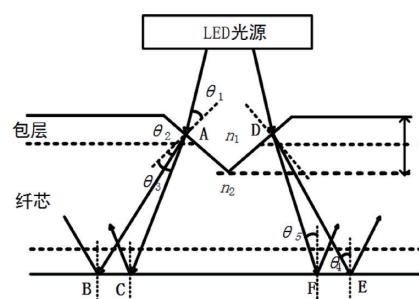


图1 光纤漏液监测剖面图

漏液检测原理图2,发射光源是由WS2811芯片和灯珠组成LED灯带组成,控制电路以一定时序扫描,左侧光功率计,用以检测扫描处耦合至光纤的光强^[14]。在未漏液时,光功率计测出的耦合光强序列随着耦合结构到光功率计距离的增大而减小;当有液体泄漏时,水流到耦合结构上,柔性灯带扫描到漏水点,该点由于光耦合强度降低,相应的光功率发生突变,结合灯带的扫描时序即可确定液漏发生的位置。

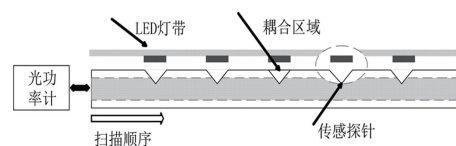


图2 漏液检测原理图

2 V型槽结构性能研究

光纤侧向耦合是对光纤进行精确加工,要求机械加工精度较高。激光雕刻机是一种用激光来雕刻物体的高级仪器。激光能量密度高、精确度高、可操作性强,是各种工业中不可缺少的替代产品。利用机器上位机进行控制,可以进行中空雕刻和非穿孔的凹槽,这样就能产生不同深浅、不同形状的花纹。

2.1 V型垂直结构

采用直径为 2mm 的光纤作为实验对象，制作耦合结构，利用软件系统进行精细绘图。在加工耦合结构前，首先需要将光纤的两端进行光学剖面处理，以确保表面光滑，我们将处理后的光纤固定在激光器操作平台上，以保持稳定的位置和定位，并采用垂直单向的加工方式，通过激光切割机控制面板，绘制 0.12mm 的圆形，挪动激光探头位置以及调节光源强度，可以控制耦合结构的加工深度。激光加工装置如图 3 所示，激光功率长期使用下可能存在功率衰减。经过多次试验，设定五种不同的光强，设置为 18%、19%、20%、21%、22%，对应的光强分别为 7.2W、7.6W、8W、8.4W、8.8W。严格按照相同的操作流程进行，通过激光共聚焦显微镜测量耦合深度。记录激光功率的大小所对应的结构深度。耦合结构深度测量图 1 中 d 的大小。如表 1 所示为设置的激光强度，对应的激光光强与耦合深度的关系。

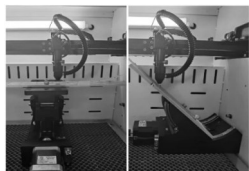


图 3 激光加工装置(左侧垂直 V 型结构,右侧倾斜 V 型结构)

表 1 激光强度与耦合深度关系

激光强度/%	激光光强/W	耦合结构深度/mm
18	7.2	0.1
19	7.6	0.12
20	8	0.2
21	8.4	0.28
22	8.8	0.4

为了确保实验结果的准确性和可靠性，针对同一光强加工五根光纤，保证加工后光纤上耦合结构一致性。随后，使用功率恒定的光源，从光纤光滑的一侧进行照射，同时另一端利用高精度的光功率计，精确测量并记录每根光纤在打孔前后的光功率值。比较不同光强加工后，不同耦合结构的平均损耗功率，图 4 为不同激光功率的损耗。光纤的插入损耗计算公式表示为

$$\tau=-10\log\frac{P}{P_0}\tag{3}$$

式中， P_0 为未加工光纤耦合结构探测到的光功率； P 为光源给光纤传输经过耦合结构接收到的光功率。

针对不同的光强，激光功率为 21%、22% 时，结构深度较大，导致纤芯有过大的裂纹，这种情况不仅会导致光纤过度损伤直接断裂，也会使其

损耗过大。激光功率为 18%、19% 时，光强过低，只会破坏浅层包层部分，加工不充分，无法形成良好的 V 型结构。

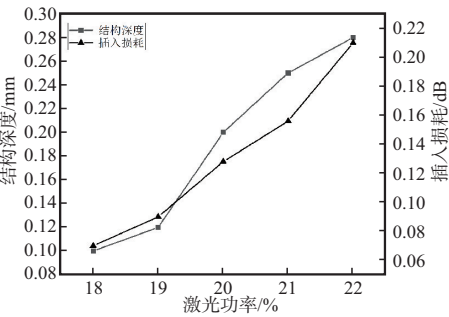


图 4 插入损耗与结构深度的关系

在实验过程中，可能存在一些误差因素，如光纤固定的稳定性、激光切割的精度、光学检测设备的误差等。为了减少误差，在实验中采取了多次测量取平均值的方法，图 5 所示为单个激光功率对应的插入损耗，确保实验结果的可靠性。

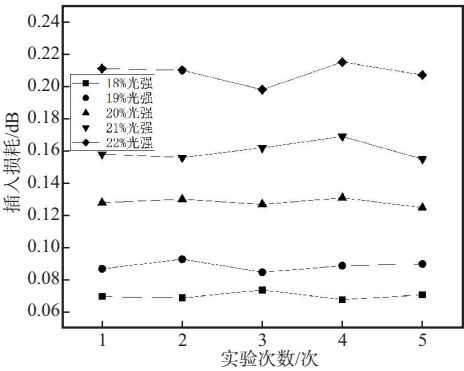


图 5 光纤插入损耗重复性测试

图 6 所示为不同激光强度（激光强度依次为 18%，19%，20%，21%，22%）加工的结构显微图像，在 20% 的光强下，光纤的 V 型结构更加规整，且损耗相对较低，在保证加工质量的同时，能够有效地减少光传输损耗，提高光纤的通信性能。经过一系列的实验和数据分析，发现 20% 光强下加工的光纤性能较好。

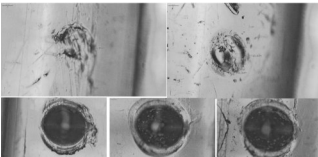


图 6 不同光强下的结构显微图像

2.2 V型倾斜角度

上述实验可以得出加工的垂直 V 型耦合结构光功率损耗偏低，但判断结构耦合效率是否达到设计要求，需要进一步改善与实验。

相比于垂直结构的加工，需要使用角度控制台用于精确调整光纤的加工角度，这一步将光源功率

设定为 20%，角度范围设置为 0~45°，以 15°为间隔进行打孔操作。取五根相同光纤进行同一角度加工，通过显微镜对比孔型面积大小，图 7 所示为同一角度的显微图像，有良好的一致性。使用光功率计对光纤进行测试，测量不同角度下的光纤的损耗等参数。插入损耗是评估光纤侧向耦合性能的关键指标之一，一般要求光纤的损耗要小于 0.2dB^[15]。根据表 2 可知，这四种角度均在要求范围内。

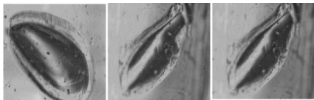


图 7 同一角度显微图像

表 2 倾斜 V 型耦合结构单根插入损耗(激光光强 8W)

不同角度/(°)	插入损耗/dB	耦合结构深度/mm
0	0.128	0.2
15	0.142	0.22
30	0.175	0.25
45	0.192	0.28

实验数据表明，不同角度的 V 型耦合结构均能将插入损耗控制在设计范围内，同时保持结构深度在合理区间。为评估 V 型结构的耦合性能，本研究采用有水与无水对比实验方法，以确定其检测漏水的准确性和可靠性。

3 系统性能测试

准备好待测试相应的实验设备，确保传感器的各个耦合结构安装正确且连接稳定。为了稳定光纤，将光纤固定在定制条纹铝板上，光源 LED 灯条位于耦合结构上方，光纤一端由黑色不透明胶带覆盖，另一端连接光功率计，将光信号传输至上位机端输出功率变化。

如图 8 所示，在无水实验中，将 V 型耦合结构放置在干燥的光纤固定板中，模拟正常未发生漏水的情况。使用光功率计对系统进行监测，电脑记录此时光功率的输出信号 P ，保证光强、波长等参数一致。观察一段时间，确保在无水状态下光功率的输出稳定，没有异常波动。接着进行有水实验。小心地将适量的水引入到耦合结构处，模拟漏水情况。再次使用光功率计监测输出信号 P' 。与无水状态下的参数进行对比，观察是否有明显的变化。

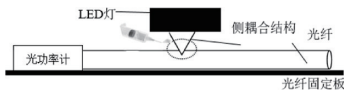


图 8 脉冲强度测量

在实验过程中，控制水的量和引入方式，确保每次实验的条件尽可能一致。保证每次实验滴水时间为 5s 左右、滴水量为 1ML，记录光功率的

输出变化等数据，计算每个耦合结构的脉冲变化。

传感器在有水和无水情况下的输出功率差可以被视为脉冲强度的一种表现方式，脉冲强度越大，缺陷耦合结构的实验效果越好。图 10 为不同角度 V 型耦合结构测试下的脉冲变化。脉冲强度变化可表示为

$$\phi = \frac{P' - P}{P} \quad (4)$$

式中， P 为滴水前无水状态接收到的光功率； P' 为滴水后有水状态接收到的光功率。

为了验证在垂直 V 型结构中，不同激光功率中选择 20% 光强这一参数合理性，对比不同激光功率加工后的插入损耗以及滴水后的脉冲强度。

图 9 对比不同强度激光加工后的插入损耗以及滴水脉冲变化，目的是确定激光功率在 20% 的情况下，垂直 V 型结构表现出最佳状态。图 11 为不同加工角度插入损耗以及滴水脉冲强度变化，方便选出最佳加工。

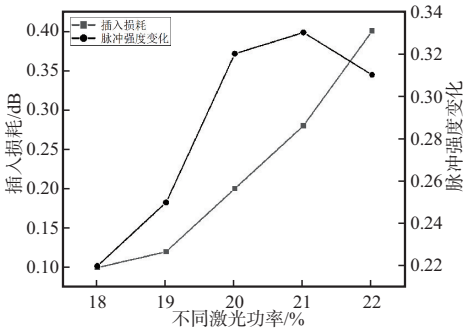


图 9 对比不同激光加工后的插入损耗以及滴水脉冲变化

通过对每个耦合结构进行多次有水与无水的实验对比，在光源光功率不变的条件下，可以用侧耦合光脉冲强度来表征侧耦合效率。根据数据对比脉冲强度变化，当耦合结构的角度为 0°、15° 时，光纤传输损耗相对较低，但脉冲强度变化也较低；然而，当 V 型结构角度增加到 30°、45° 时，虽然带来了更高的损耗，但同时耦合功率增加。

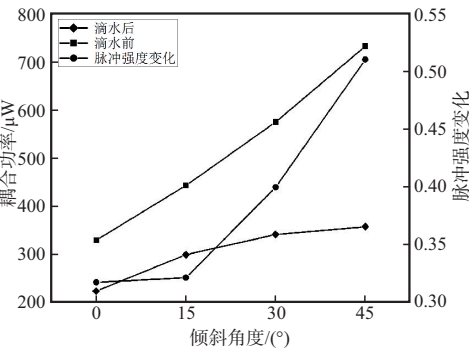


图 10 不同加工角度滴水前后的功率以及脉冲强度变化

在进行 200 个耦合结构的实验测试时，四个角度的结果均满足单个结构插入损耗在 0.2dB 以下。实验过程中结构超过 45°，会因为角度过大易造成

光纤断裂,耦合效率不易再增大,45°以上光纤耦合效率不稳定,且会出现光纤损耗增大的情况。

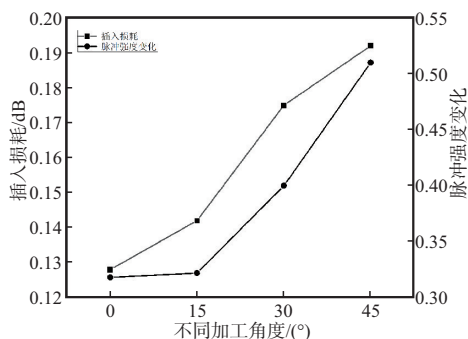


图 11 不同加工角度后插入损耗以及脉冲强度变化

数据分析表明,斜 V 型光纤耦合结构比垂直结构具有更高的耦合效率。激光刻蚀得到的耦合结构微观形貌一致性良好。其中,垂直 V 型结构虽然损耗较小,但其侧向耦合效率无法满足设计要求。为此,增加了倾斜结构的设计研究。最终实验结论如下:在单根光纤上加工耦合结构时,选用 20% 的激光功率,并借助角度控制台加工 45°斜 V 型结构,经性能测试证实,可实现插入损耗低于 0.2dB,耦合结构脉冲变化约为 51%,满足漏水检测的性能要求。

4 结 论

本文基于多源分布式光纤漏水传感器中的光纤侧耦合原理,对垂直 V 型以及倾斜 V 型结构进行分析与比较。选用精度高的激光雕刻机进行加工,最后根据光纤耦合效率以及插入损耗,对不同光功率以及倾斜角度进行对比,选用 20% 激光功率加工半径为 0.12mm 的倾斜 45°V 型结构,光纤插入损耗小于 0.2dB,滴水后的脉冲变化在 51% 左右,保证了漏水系统的稳定性与可靠性。

参考文献:

[1] 周子伟. 供水管网泄漏检测系统设计及低功耗与时间同步技术研究[D]. 西安:陕西师范大学,2022
Zhou Ziwei. Research on the design of water supply network leakage detection system and low-power consumption and time synchronization technology[D]. Xi'an:Shaanxi Normal University, 2022.

[2] 郭希健, 曹峥, 邓建强. 管道泄漏检测的主动式压力波激发膜片特性研究[J]. 化工设备与管道, 2024, 61(03):104—110.
Guo Xijian, Cao Zheng, Deng Jianqiang. Study on the characteristics of the active pressure wave excitation diaphragm for pipeline leakage detection[J]. Process Equipment & Piping, 2024, 61 (03):104—110.

[3] 汪歆蕾. 基于水听器声波探测的供水管道泄漏检测方法研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2024
Wang Xinlei. Research on leakage detection method of water supply pipeline based on hydrophone acoustic detection[D]. Hefei:Anhui Jianzhu University, 2024

[4] 冯维一, 刘礼华, 张旭革, 等. 基于光纤拉曼测温的腐蚀性酸溶液渗漏检测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(11):111—115

Feng Weiyi, Liu Lihua, Zhang Xuping, et al. Study on leakage detection technology of corrosive acid solution based on fiber raman temperature measurement[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40 (11):111—115

[5] 马占鹏. 基于 BRDF 的随机粗糙表面光散射特性研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2023
Ma Zhanpeng. Research on light scattering characteristics of random rough surfaces based on BRDF[D]. Xi'an:University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2023.

[6] 李栋, 李雪松, 王迪, 等. 制氢厂房氢泄漏激光检测光路布置优化研究[J]. 化工自动化及仪表, 2024, 51(04):599—606
Li Dong, Li Xuesong, Wang Di, et al. Optimization study on optical path arrangement for hydrogen leakage detection in hydrogen plant[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2024, 51(04):599—606

[7] 杨洋. 基于拉曼散射的分布式光纤测温系统的研究与实现[J]. 电子技术应用, 2017, 43(12):59—60+64
Yang Yang. Research and implementation of distributed optical-fiber temperature measurement system based on raman scattering [J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(12):59—60+64

[8] Zhang Yingzi, Hou Yulong, Zhang Yanjun, et al. A cost-effective quasi-distributed liquid leakage sensor based on the polymer optical fiber and flexible lamp belt with LEDs[J]. Optics Express, 2018, 26(8):10152—10161.

[9] 金绍深. 基于微纳光纤环与侧边抛磨光纤耦合的上下滤波滤波器研究[D]. 广州:暨南大学, 2014.
Jin Shaoshen. Add-Drop filter by coupling between micro-nano fiber ring and side polished fiber[D]. Guangzhou:Jinan University, 2014.

[10] Wang J, W Gao, Y Hu, et al. Liquid leakage sensor with a v-shaped defect coupling structure based on polymer optical fibers [J]. Ieee Photonics Journal, 2021, 13(5):6800105.

[11] 华滨, 葛俊峰, 叶林, 等. 泄漏式光纤液位测量方法研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(05):39—43
Hua Bin, Ge Junfeng, Ye Lin, et al. Review of optical fiber liquid level measurment based on light leakage[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35 (05):39—43

[12] 侯钰龙, 姚嘉迪, 邱婉琳, 等. 基于光纤多源扫描定位的准分布式漏水传感器[J]. 光学技术, 2020, 46(05):557—561
Hou Yulong, Yao Jiadi, Qiu Wanlin, et al. Based on optical fiber source scanning positioning ofquasi distributed leakage sensors [J]. Optical Technique, 2020, 46 (05):557—561

[13] 高小龙, 王刚, 翟成瑞, 等. 基于侧向耦合结构的准分布式光纤液漏传感器[J]. 光学技术, 2019, (4):453—457.
Gao Xiaolong, Wang Gang, Zhai Chengrui, et al. Quasi-distributed optical fiber liquid leakage sensors based on lateral coupling structure[J]. Optical Technique, 2019, (4):453—457

[14] 李莹洁, 侯钰龙, 沈三民, 等. 基于侧向菲涅尔透镜耦合的光纤漏水传感器设计[J]. 电子技术应用, 2023, 49(08):59—64
Li Yingjie, Hou Yulong, Shen Sanmin, et al. Design of optical fiber water leakage sensor based on lateral Fresnel lens coupling [J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(08):59—64

[15] 李华强. 军用光纤连接器技术近期发展动向[J]. 光通信技术, 2015, 39(03):21—23
Li Huaqiang. Recent trend of military optical fiber connector technology[J]. Optical Communication Technology, 2015, 39 (03):21—23