

一种面向港口溢油监测的小型激光荧光遥测系统

刘德庆^{1,2}, 栾晓宁¹, 郭金家¹, 崔廷伟², 金久才², 郑荣儿¹

(1. 中国海洋大学 光学光电子实验室, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 目前, 针对港口溢油巡航监测缺乏行之有效的技术手段。为探索激光诱导荧光光谱技术应用于港口溢油监测的可行性, 以微型光纤光谱仪搭建小型激光荧光遥测实验系统, 并对其性能进行测试分析。结果发现, 在光谱仪曝光时间设为最小(1.11 ms)的情况下, 环境光对荧光测量仍会产生影响, 利用减背景法可以有效去除溢油荧光信号中环境光的影响; 在相同条件下, 系统测得不同油质溢油样品的荧光光谱表现出不同的光谱特征, 轻质油较重质油的荧光峰蓝移、荧光更强; 在上述环境光背景影响和光谱测量分析的基础上, 进一步测试了系统的信号探测稳定性, 结果显示, 系统重复测量的相对标准偏差 $RSD=2.54\%$, 表明该系统具有较好的信号探测稳定性。综上, 基于微型光纤光谱仪的小型溢油激光荧光遥测系统可望在近岸港口溢油巡航监测中发挥重要作用。

关键词: 港口溢油; 激光诱导荧光; 微型光纤光谱仪; 遥测系统; 环境监测

中图分类号: O433.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)01-0065-05

DOI: 10.11759/hyxx20171011026

近年来, 频发的溢油事故对海洋生态环境造成严重污染, 溢油问题引起各界广泛关注^[1-2]。港口作为连接陆地和海上运输贸易的重要枢纽, 随着进出港船舶作业的增加, 以及沿岸石油储备基地的建设, 在港口近岸海域发生溢油事故的频次也逐渐增加^[3]。此类溢油事故的特点是: 规模相对较小、溢油发生频率高。

激光诱导荧光作为一种主动探测技术是海洋溢油探测最有效的手段之一, 其突出优势在于不同种类溢油识别^[4-5]。面向海洋溢油探测的激光荧光遥感探测技术主要包括机载和船载海洋荧光激光雷达。其中, 机载海洋激光雷达的特点是探测距离较远、可实现扫描测量等, 一般适合大范围探测^[6-7]; 而船载海洋激光雷达可以进行定点和走航探测^[8-9]。总体来说, 传统的机载和船载激光荧光遥测技术一般适合大范围走航式探测, 并不适用于频发的近岸港口溢油的监测需求。然而, 目前针对港口溢油探测的技术手段主要采用定点观测的方式^[10], 对于港口近岸海域的巡航溢油监测缺乏行之有效的监测技术手段。

无人船作为一种新型的水上自主运载平台, 可搭载多种传感器, 进行水体环境监测^[11]。无人船平台具有自动测量、方便灵活等技术特点, 在海洋环境监测应用中相比于传统的船舶走航和定点观测等具有明显技术优势, 其在水环境调查、水深测量以及海洋物理参数测量等方面得到应用^[12-14]。

微型光纤光谱仪具有体积小、重量轻等特点, 因此, 本文针对近岸港口溢油监测需求, 从小型化着手, 拟开展微型光纤光谱仪在溢油激光荧光遥测中应用的可行性研究, 以期结合无人船自主运载平台, 发展面向近岸港口溢油的巡航监测技术。

1 系统与实验

1.1 激光荧光遥测系统

图 1 是利用微型光纤光谱仪所搭建溢油激光荧光遥测系统的原理图, 激发光源为氮分子激光器(LTB, MNL 103-LD)输出的 337 nm 激光, 激光脉冲重复频率为 10 Hz, 单脉冲能量为 90 μJ , 单脉冲宽度为 3 ns。激光先后经过凹凸透镜实现扩束与准直, 以增大激光与油膜表面的作用面积和实现遥测。经扩束后的激光光斑尺寸约为 10 mm, 准直后的激光束

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405203); 国家自然科学基金(41406111, 61401111); 国家海洋公益性行业科研专项(201505005-2)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No. 2017YFC1405203; National Natural Science Foundation of China, Nos. 41406111 and 61401111; Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean under contract, No. 201505005-2]

作者简介: 刘德庆(1988-), 男, 山东安丘人, 工程师, 研究方向为无人船平台及海洋激光探测技术, 电话: 0532-88965390, Email: liudeqing@fio.org.cn; 郑荣儿, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为激光光谱技术及其应用研究, Email: rzheng@ouc.edu.cn

经空间传输后与油膜表面作用产生荧光信号。返回的信号采用孔径为 76 mm, F 数为 3.95 的牛顿望远镜收集, 望远镜与激光之间采用共轴的方式。信号经望远镜收集并耦合进芯径为 200 μm (1 \times 19)的光纤, 再

通过光纤导入微型光纤光谱仪中实现光谱测量。延时信号发生器用于激光器和光谱仪之间的时序控制, 其输出两路具有固定延时的 TTL 信号, 分别作为激光器和光谱仪的外触发信号, 以实现二者的同步工作。

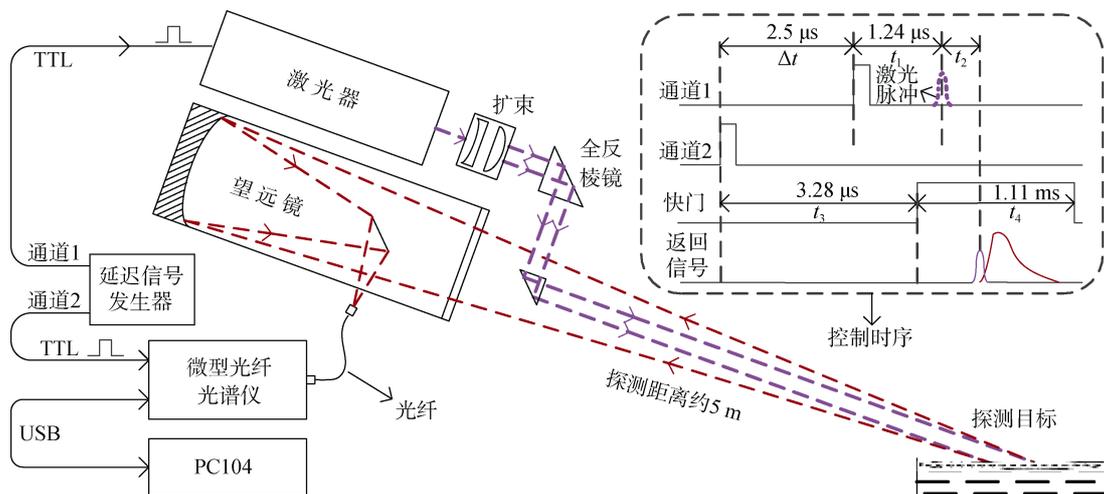


图 1 基于微型光纤光谱仪的激光荧光遥测系统原理图

Fig. 1 The schematic of micro fiber spectrometer based LIF remote detection system

用于光谱测量的微型光纤光谱仪(Avantes, AvaSpec-ULS2048L)所具有的特点包括: (1)具有外触发功能, 且外触发脉冲的延时可调, 最小延时为 3.28 μs ; (2)积分时间可调, 最小为 1.11 ms; (3)狭缝宽度可调, 其中实验中采用 200 μm 的宽度, 以增大通光量; (4)具有体积小、重量轻(175 mm \times 110 mm \times 44 mm, 0.716 kg)的特点, 可满足系统小型化的要求。

1.2 荧光光谱测量

光谱测量采用距离选通的方式, 测量的时序如图 1 中的嵌入图所示。系统中的激光器和微型光纤光谱仪均处于外触发工作模式。延时信号发生器的两个通道输出两路具有固定延时 Δt 的 TTL 信号, 分别作为激光器和光谱仪的外触发信号, 其中通道 1 的信号用于激光器的触发工作, 通道 2 的信号用于光谱仪的触发工作。激光器从被触发工作到激光输出有固定的延时 t_1 , 从激光输出到信号返回的传输延时为 t_2 ; 光谱仪从接收外触发信号到快门打开的延时 t_3 , 且 t_3 可调, 通过调节 t_3 , 使得信号返回时光谱仪的快门是打开的, 即满足如下关系 $t_3 < \Delta t + t_1 + t_2 < t_3 + t_4$, 以实现距离选通探测。光谱仪快门的门宽 t_4 可调。

1.3 模拟溢油样品制备

系统测试所用油样品为海洋溢油的典型油源, 包括汽油、柴油以及来自胜利油田“渤 601”、“埭北 305”、“商 541”、“埭北 306”、“夏 510”、“史 138”

和“郑气 3”七个井区的原油。各油样的密度和 API (American Petroleum Institute) 重度参数如表 1 所示。

表 1 所用油样品的密度和 API 重度参数

Tab. 1 The density and API gravity of oil samples

油样	密度/(kg/L)	API 重度	
成品油	汽油	0.725	63.4
	柴油	0.835	38.0
原油	渤 601	0.807	43.9
	埭北 305	0.823	40.3
	商 541	0.836	37.8
	埭北 306	0.860	33.0
	夏 510	0.866	31.9
	史 138	0.905	24.9
	郑气 3	0.979	13.1

原油密度和 API 重度反映了原油的油质, 密度大的原油组分中含有更多的重质组分, 密度小的则轻质组分含量相对较高。实验时对每种油样品的处理如下: 首先将海水放入样品池中, 然后将油样滴在海水表面, 经一段时间扩散成油膜覆盖于水表面, 以近似模拟海洋溢油的状态。

2 结果与讨论

2.1 环境光对光谱测量的影响

图 2 是设置微型光纤光谱仪的曝光时间为最小

(1.11 ms), 然后分别在日光灯背景和太阳光背景条件下, 柴油荧光光谱的测量结果。其中, 图 2(a)为在日光灯背景下测得的柴油荧光光谱、环境光背景以及去除背景光后的柴油荧光光谱, 图 2(b)为在太阳光背景下测得的柴油荧光光谱、环境光背景以及去除背景光后的柴油荧光光谱, 图 2(c)为去除日光灯、太阳光背景下柴油荧光光谱的对比结果。在相同条件下, 利用减背景的方法去除光谱中环境光背景噪声。

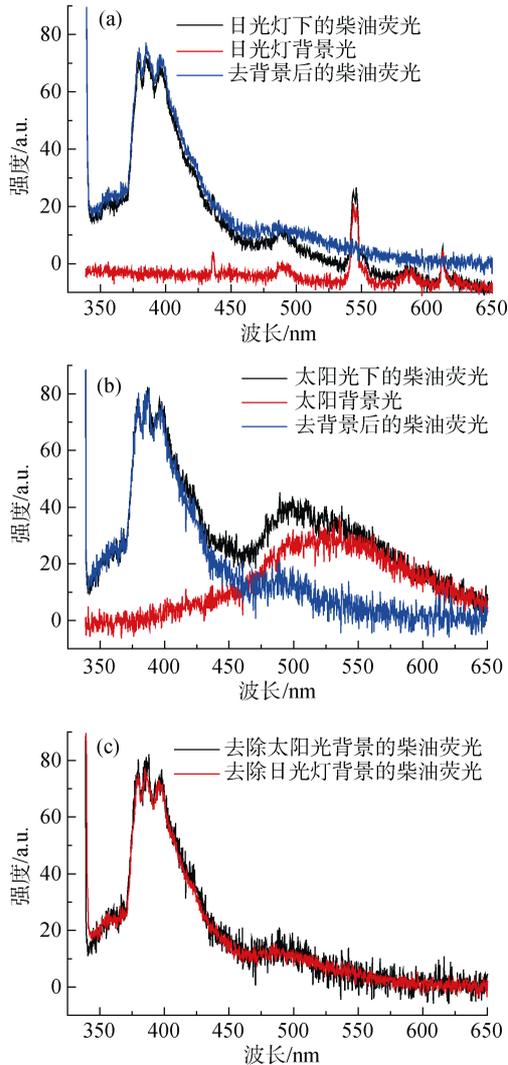


图 2 不同环境光背景下柴油荧光光谱的测量结果

Fig. 2 Diesel fluorescence spectrum under different ambient light conditions

(a)日光灯背景下, (b)太阳光背景下, (c)去除日光灯、太阳光背景柴油荧光光谱的对比
(a) Background of fluorescent light, (b) Background of sunlight, (c) Comparison of (a) and (b)

从图 2(a)、2(b)可以看出, 在微型光纤光谱仪的曝光时间设为最小(1.11 ms)的情况下, 环境光仍会影响荧光信号的测量。从图 2(c)可以看出, 在不同环

境光背景下, 通过去除背景光后得到的荧光光谱基本吻合, 由此可知, 在光谱测量时, 连续测量一次环境光背景下的荧光信号和一次环境光背景噪声, 通过减背景法可以有效去除环境光对荧光信号的影响。

2.2 不同类型模拟溢油样品荧光光谱

接下来利用搭建的溢油激光荧光遥测实验系统, 通过测量汽油、柴油以及来自胜利油田 7 个井区原油等典型模拟溢油样品的荧光光谱, 以确定其对不同油荧光光谱的探测能力。其中原油样品分别为来自胜利油田的“渤 601”、“埕北 305”、“商 541”、“埕北 306”、“夏 510”、“史 138”和“郑气 3”, 它们的密度从小到大, 即油质从轻到重。

图 3 是在相同条件下测得的并通过减背景法处理得到的不同油样的荧光光谱。从中可以看到, 在同一条件下, 利用微型光纤光谱仪对成品油(柴油、汽油)和轻质原油的信号测量效果较好, 然而对于重质油的探测效果不佳, 原因是相比于轻质油, 重质油的荧光激发效率低, 且存在光谱仪的探测器(线阵 CCD)灵敏度、激光器的激光波长和能量等因素影响, 因此, 后续将微型光纤光谱仪应用于溢油激光荧光遥测, 还需对激光器关键器件进行合理选型。

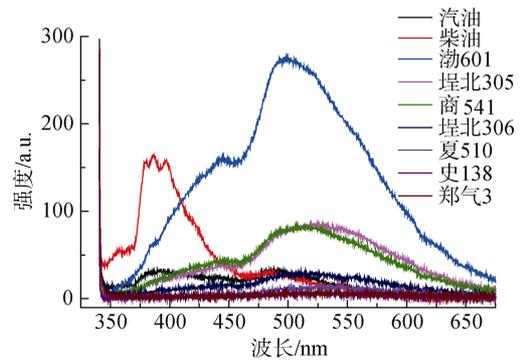


图 3 不同油样荧光光谱的测量结果

Fig. 3 Fluorescence spectra of different oils

2.3 系统探测稳定性分析

在上述光谱测量及环境光背景影响分析的基础上, 进一步对溢油激光荧光遥测系统的信号探测稳定性进行测试。测试时选择柴油作为探测目标, 激光荧光遥测系统在 5 m 探测距离下, 对柴油油膜的同一个位置进行 50 次重复测量, 然后选择柴油荧光光谱中最前光谱峰位处(385.78 nm)的荧光强度来评估系统的稳定性。

图 4 是以柴油样品作为探测目标, 对系统的信

号探测稳定性进行测试的结果。测量结果显示了系统重复测量的相对标准偏差 $RSD=2.54\%$ ，表明该系统具有较好的信号探测稳定性。

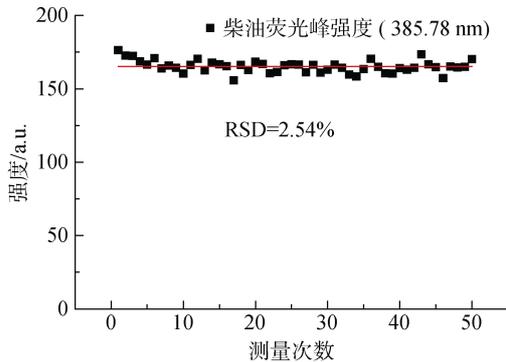


图4 激光荧光遥测系统探测稳定性测试结果

Fig. 4 The stability test result of the LIF remote detection system

3 结论

为探索激光诱导荧光光谱技术应用于港口溢油监测的可行性，以微型光纤光谱仪搭建小型激光荧光遥测实验系统，并对其性能进行测试分析。结果发现，在微型光纤光谱仪曝光时间设为最小的情况下，环境光对荧光测量仍会产生影响，而通过连续测量一次环境光背景下的荧光和一次环境光，利用减背景法可以有效去除环境光对荧光信号的影响。另外，在相同条件下系统对轻质油荧光的测量效果较好，而对重质油则效果不佳，原因是相比于轻质油，重质油的荧光激发效率低，且存在光谱仪的探测器灵敏度、激光器的激光波长和能量等因素影响，因此，后续将微型光纤光谱仪应用于溢油激光荧光遥测，还需对激光器等关键器件进行合理选型。在上述光谱测量及环境光背景影响分析的基础上，进一步测试了溢油激光荧光遥测系统的信号探测稳定性，结果显示，系统重复测量的相对标准偏差 $RSD=2.54\%$ ，表明该系统具有较好的信号探测稳定性。

参考文献:

[1] Fingas M. Oil spill science and technology[M]. Gulf Professional Publishing, 2010.
 [2] Leifer I, Lehr W J, Simecek-Beatty D, et al. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 185-209.
 [3] 宋向群, 刘佳, 唐国磊. 船舶进出港规则对沿海港口

散货港区航道通过能力的影响[J]. 水运工程, 2012, 9: 122-125.

Song Xiangqun, Liu Jia, Tang Guolei. Influence of rules ship entering and departure on waterway capacity in coastal import bulk port area[J]. Port & Waterway Engineering, 2012, 9: 122-125.

- [4] Fingas M, Brown C. Review of oil spill remote sensing[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 83(1): 9-23.
 [5] Liu D, Luan X, Guo J, et al. A new approach of oil spill detection using time-resolved LIF combined with parallel factors analysis for laser remote sensing[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1347.
 [6] Brown C E, Marois R, Fingas M F, et al. Airborne oil spill sensor testing: progress and recent developments[C]. International Oil Spill Conference, 2001, 2: 917-921.
 [7] Li X, Zhao C, Ma Y, et al. Field experiments of multi-channel oceanographic fluorescence lidar for oil spill and chlorophyll-a detection[J]. Journal of Ocean University of China, 2014, 13(4): 597-603.
 [8] Cecchi G, Pantani L, Breschi B, et al. FLIDAR: a multipurpose fluorosensor spectrometer[J]. EARSeL Advances in Remote Sensing, 1992, 1(1): 72-78.
 [9] Yarovenko N V, Cruz M, Vilas L, et al. Oil pollution using shipborne LIFLIDAR[C]. 5th EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone. 2011: 94-103.
 [10] 陈璇琳, 竺柏康, 王东光. 港口码头溢油监测报警系统的研究现状及展望[J]. 中国水运, 2015, 15(7): 64-66.
 Chen Xuanlin, Zhu Bokang, Wang Dongguang. Research status and prospect of oil spill monitoring and alarm system in port[J]. China Water Transport, 2015, 15(7): 64-66.
 [11] Liu Z, Zhang Y, Yu X, et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2016, 41: 71-93.
 [12] Yaakob O, Mohamed Z, Hanafiah M S, et al. Development of unmanned surface vehicle (USV) for sea patrol and environmental monitoring[C]. 8th International Conference on Marine Technology, Kuala Terengganu, 2012: 20-22.
 [13] 金久才, 张杰, 邵峰, 等. 一种海洋环境监测无人船系统及其海洋应用[J]. 海岸工程, 2015, 34(3): 87-92.
 Jin Jiucan, Zhang Jie, Shao Feng, et al. An unmanned surface vehicle for ocean environment monitoring and its oceanic application[J]. Coastal Engineering, 2015, 34(3): 87-92.
 [14] Liu D, Luan X, Zhang F, et al. An USV-based laser fluorosensor for oil spill detection[C]. 10th International Conference on Sensing Technology (ICST). IEEE, 2016: 1-4.

A small LIF remote detection system for port oil spill monitoring

LIU De-qing^{1, 2}, LUAN Xiao-ning¹, GUO Jin-jia¹, CUI Ting-wei², JIN Jiu-cai², ZHENG Rong-er¹

(1. Optics and Optoelectronics Laboratory of Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. The First Institute of Oceanography of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Oct. 11, 2017

Key words: Port oil spill; Laser-induced fluorescence; Micro fiber spectrometer; Remote detection system; Environment monitoring

Abstract: There is presently no effective technical means for port oil spill cruise monitoring. To evaluate the feasibility of a laser-induced fluorescence technique for oil spill monitoring in ports, a small LIF remote detection system was established using a micro fiber spectrometer, and its performance was tested in this study. It was found that the ambient light had an impact on the oil spill fluorescence signal even when the exposure time of the spectrometer was set to a minimum (1.11 ms), and the influence of ambient light on the fluorescence signal can be effectively avoided using a background subtraction method. Under the same conditions, fluorescence spectra measured by the system of different oil spill samples showed different spectral characteristics; the blue peak shift of light oil was stronger than that of heavy oil. The stability of the system in detecting fluorescence signals was tested, and the relative standard deviation (RSD) of the system had a repeated value of 2.54%, which indicates that the system has a better signal detection stability. In summary, the micro fiber spectrometer-based LIF remote detection system is expected to play an important role in port oil spill monitoring.

(本文编辑: 康亦兼)