

浮标式油膜厚度测量传感器的研制

吴 颀^{1,2} 吕且妮^{1,2} 葛宝臻^{1,2}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)
(² 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 针对海面溢油油膜厚度的测量, 基于垂直入射式差分激光三角法原理, 研制了可机载投放的浮标式油膜厚度测量传感器。介绍了传感器的组成和原理, 给出了系统集成与调试过程, 以 0 级陶瓷量块为标准厚度, 采用最小二乘拟合高次曲线的方法对传感器进行了标定。选用 1.4~9.4 mm 量块对传感器进行了精度测量, 测量相对误差小于 1%。

关键词 传感器; 油膜厚度测量; 浮标; 垂直入射; 差分激光三角法

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0108004

Development of Oil Film Thickness Sensor Based on Buoy

Wu Di^{1,2} Lü Qieni^{1,2} Ge Baozhen^{1,2}

(¹ School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University,
Tianjin 300072, China)
(² Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education,
Tianjin 300072, China)

Abstract According to the measurement of oil film thickness on the sea, an oil film thickness sensor based on buoy is developed using vertical incidence differential laser trigonometry. The composition and principle of sensor is introduced and the process of the system integration and debugging is presented. Ceramic grade 0 gauge block is measured as a standard thickness and high order curve is fitted based on least square method for the calibration of the sensor. 1.4~9.4 mm gauge blocks are measured to verify the precision. The results show that the measurement relative error is less than 1%.

Key words sensors; oil film thickness measurement; buoy; vertical incidence; differential laser trigonometry

OCIS codes 120.3620; 120.4640; 120.4820

1 引言

海面溢油油膜厚度的准确测量是海洋环境监测的难点, 目前已提出了微波辐射法、白光干涉法、激光声学法等多种测量技术与方法^[1-4]。本课题组将激光三角测厚技术应用于海面溢油油膜厚度测量, 研究了基于斜射式激光三角法的单光路^[5]与差分光路测量方法^[6-7], 以及相关数据处理算法^[8], 并设计了基于斜射式差分激光三角法的光学系统^[9]。基于

斜射式激光三角法是通过油膜表面对入射光束的反射, 接收成像系统对反射光成像, 其分辨率高于基于直射式的测量方法。但在海面溢油油膜厚度测量的实际应用环境中, 油膜会随海水的波动发生波动, 当油膜表面倾斜时, 反射光会发生偏转而带来测量误差, 偏转大时, 甚至无法进入接收的成像系统, 而直射式激光三角法是对油膜表面入射光斑的散射光成像, 光斑像点不随表面倾斜而移动, 因而, 更适用于

收稿日期: 2013-07-08; **收到修改稿日期**: 2013-08-29

基金项目: 国家 863 计划(2008AA09Z115)、国家自然科学基金(40876050)

作者简介: 吴 颀(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事油膜厚度测量和光电检测等方面的研究。

E-mail: wd101101@126.com

导师简介: 葛宝臻(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电检测技术和二维成像技术等方面的研究。

E-mail: gebz@tju.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

海面溢油油膜测量。本文基于直射式差分激光三角法的测量方法,成功研制了可以机载投放的浮标式油膜厚度测量传感器样机。

2 系统组成与原理

基于直射式差分激光三角法的浮标式油膜厚度传感由浮标系统和数据接收处理系统组成,浮标系统包括光学测量系统模块,供电系统模块、通信系统模块、采样池和浮标体。其测量原理如图 1 所示,光路系统采用垂直入射的双光路差分测量系统,上、下光

路的激光束位于同一垂线上,并分别垂直照射在油膜的上下表面上形成散射光斑,由接收透镜将光斑成像于 CCD 的靶面上,由 CCD 接收上下光斑信号,经数据采集卡采集光斑数据,再由数字信号处理器(DSP)和现场可编程门阵列器件(FPGA)组成的图像处理模块进行数据处理,包括滤波、阈值分割、提取光斑图像中心,得到上下光斑中心位置数据,并由无线发射系统将光斑中心位置数据发射出来,由位于浮标外的机载接收系统或地面接收系统接收数据,根据预先标定好的数据进行计算处理,得到油膜厚度值。

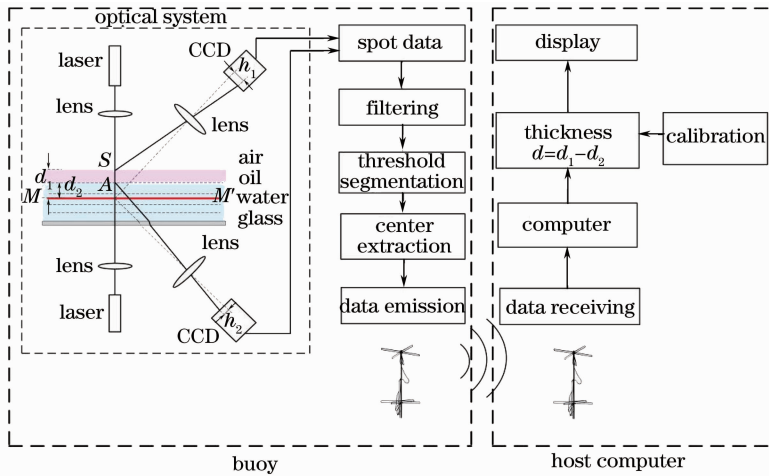


图 1 浮标式油膜厚度传感器原理示意图

Fig. 1 Schematic of oil film thickness sensor based on buoy

假设基准面位于油膜下面的水中 MM' 处,油膜上表面相对于 MM' 的距离为 d_1 ,对应的 CCD 像面上相对于基准点偏移量为 h_1 ,油膜下表面相对于 MM' 的距离为 d_2 ,对应的 CCD 像面上相对于基准点偏移量为 h_2 ,由于上下光路共同的基准面位于油膜下的水里面,因此, d_1 和 d_2 总是正值,测量中无需考虑 d_1 和 d_2 符号,直接差分计算就能得到油膜厚度。当光学系统参数确定后,可以得到不同位置 d_1 与 h_1 的关系曲线 $d_1 = f(h_1)$ 和不同位置 d_2 与 h_2 的关系曲线 $d_2 = f(h_2)$,由此可求出油膜厚度

$$d = d_1 - d_2. \quad (1)$$

由图 1 可知,在上光路系统中,根据直入射激光三角法的原理, d_1 与 h_1 的关系为

$$d_1 = \frac{uh_1(u-f)}{uf \sin \theta + (u-f)h_1 \cos \theta}, \quad (2)$$

式中 u 为物距, f 为透镜焦距, θ 为激光束与透镜主轴之间的夹角。

与上光路系统不同的是下光路一部分处于水中,一部分处于空气中,因此不能直接用三角法原理公式。对于下光路系统,由于受到水的折射率影响,其详细的光路如图 2 所示。下光路激光器发出的光束到油膜下表面 A 处形成激光斑点,并由成像系统成像于 CCD 靶面上。油膜下表面到基准面 MM' 的距离 d_2 等效在空气中物面的距离为 H_2 ,根据折射定律和激光三角法原理可得 d_2 与 h_2 的关系为

$$d_2 = (z_1 \cos \theta_1 + H_2) \sqrt{n_1^2 + (n_1^2 - 1) \left(\frac{z \sin \theta_1}{z \cos \theta_1 + H_2} \right)^2} - z_1 \cos \theta_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - \sin^2 \theta_1}{1 - \sin^2 \theta_1}}, \quad (3)$$

式中 $H_2 = \frac{zh_2(z-f)}{zf \sin \theta_1 - (z-f)h_2 \cos \theta_1}$, n_1 为水的折射率, z 为等效为空气中的物距, z_1 为 z 被水与空气界

面分割后在水中的距离, θ_1 为激光束与透镜主轴之间的夹角。

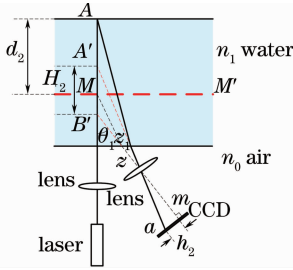


图 2 直入射下光路系统光路图

Fig. 2 Schematic of vertical incidence lower optical system

可以看出,(2)式和(3)式是非线性公式,实际测量中难以获得角度、物距等各项参数的精确值,因此,不能直接求解方程得出测量值。通常采用标定的方法^[10-14],得到被测厚度与像移的关系。

浮标体及采样池设计示意图如图 3(a)所示,外观设计为圆柱形,总高 1030 mm,直径 270 mm。浮标体顶部装有无线路发射的天线,中间是圆柱壳体,装有光学测量系统、通讯模块及电池等。配重分为固定配重和可调配重,固定配重置于浮标体内部底端,可调配重悬挂浮标体外部底端。同时,根据计算和实验值来设计浮体大小,目的是通过浮体和配重调整浮标的重心与浮心,使浮标能在海水中能保持直立姿态及保持良好的随波性,且吃水线位于测量窗口的中间位置。采样池设计如图 3(b)所示,其直径 303 mm,窗口高度为 30 mm,宽度为 80 mm,以便于在海面随波运动的情况下,海水及油膜均可自由进出采样池。采样池上开有光学测量窗口。

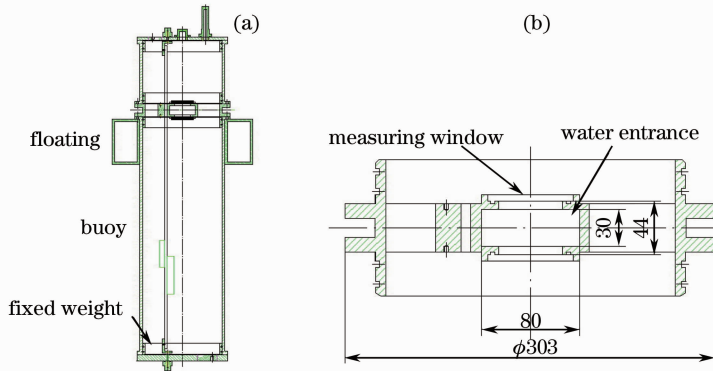


图 3 (a) 浮标体机械结构示意图;(b) 采样池结构示意图

Fig. 3 (a) Schematic of buoy mechanical structure; (b) schematic of sample pool mechanical structure

3 系统集成与调试

图 4 为浮标式传感器实物图,图 4(a)为系统内部立板正面,装有光路系统模块,供电模块以及电源

转换模块;图 4(b)为立板背面,装有数据采集与处理模块以及通讯模块;图 4(c)为完成装配后的系统整体照片,通过浮体和配重相互配合,以保证浮标姿

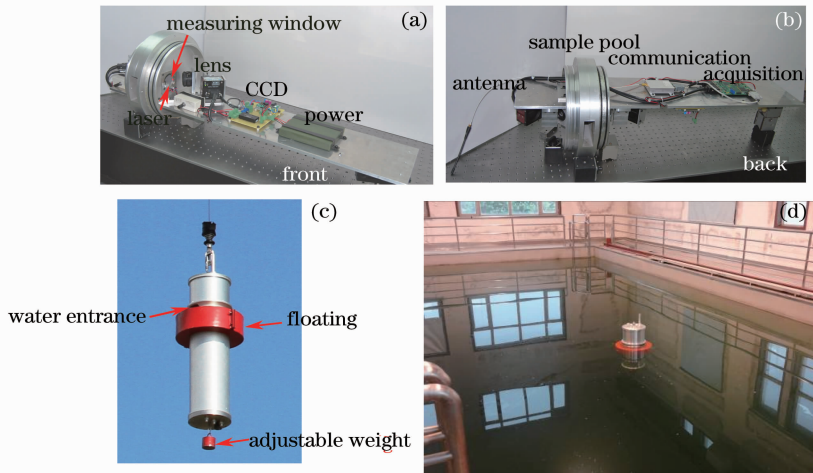


图 4 系统集成及整机调试实验照片

Fig. 4 Photos of system integration and debugging experiment

态和随波性,可调配重作用是进行浮标状态的精确调整。完成了整体系统组装后,对系统进行调试及整机性能验证实验,水密、水压、配重等环境实验,以及室内水池的整机联调实验。图 4(d)为调试好处于水池中的浮标系统实验照片。

4 测量传感器的标定

4.1 传感器的标定实验

为了获得准确的标定曲线,将浮标放入水槽中来模拟实际测量环境,如图 5(a)所示。水槽内加水到浮标的吃水线,上光路位于空气中,下光路位于水中,通过外部上位机接收数据及输出测量结果。

采用 0 级陶瓷量块作为厚度标准对系统进行标定及精度验证。为固定陶瓷量块,设计量块专用支架,如图 5(b)所示。标定时,将陶瓷量块放入浮标进水口内,保证量块上表面位于空气中,下表面位于水中。基准线 MM' 设在吃水线下 3mm 位置,其对应的上下相机光斑中心像素值作为上下光路像移 0 点。依据设计要求确定的上下光路量程分别为

12 mm 与 10 mm。对于上光路选用 1~12 mm 量块放置在基准位置上,量块上表面即为标准厚 1~12 mm,共 12 个值。对于下光路选用两组 1~10 mm 量块,两块相同厚度的量块放置在基准位置的两边,将另一量块横放在两边的量块上,其下表面即为标准厚度 1~10 mm,共 10 个值。每一个厚度分别测量 32 个数据,求其平均值作为标定的原始数据,上下光路的标准厚度与测得的像移如表 1 所示。利用最小二乘法对上、下光路原始数据进行多项式拟合。

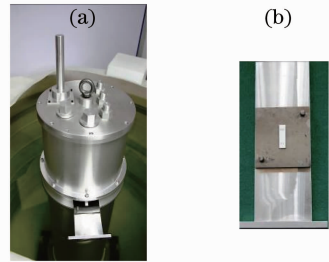


图 5 (a) 系统标定实验; (b) 量块专用支架
Fig. 5 (a) System calibration experiment;
(b) fixture for ceramic gauge block

表 1 上、下光路系统标定原始数据(单位:mm)

Table 1 Calibration original data of upper and lower optical system (unit: mm)

d_1/d_2	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000	11.0000	12.0000
h_1	1.5704	3.2047	4.9271	6.7023	8.5242	10.4756	12.4400	14.4330	16.4544	18.5265	20.6666	23.1537
h_2	2.2017	4.4262	6.5749	8.5967	10.5957	12.5948	14.1436	16.3379	18.1748	20.0157	—	—

为了确定标定曲线的拟合次数,上下光路分别拟合 1~6 次的标定曲线,并利用不同次数的上下光路标定曲线分别对 5.1~5.9 mm(以 0.1 mm 为增量,共 9 个值)以及 1.7~9.7 mm(以 1 mm 为增量,共 9 个值)两组量块进行测量,并分别计算每组量块测量结果与标准厚度值的误差平方和,由计算结果可知,当选用上光路 4 次拟合,下光路 2 次拟合时,两组量块的误差平方和分别为 0.0015 和 0.0016,与更高次拟合结果相比变化较小,而明显小于更低次拟合结果,因此,选定上光路 4 次拟合,下光路 2 次拟合的标定方案。可以得出上、下光路标定公式为

$$d_1 = -1.7535 \times 10^{-5} h_1^4 + 8.8098 \times 10^{-4} \cdot h_1^3 - 0.0185 h_1^2 + 0.6956 h_1 - 0.0582, \quad (4)$$

$$d_2 = 3.0703 \times 10^{-3} h_2^2 X + 0.4389 \cdot h_2 - 2.6434 \times 10^{-3}, \quad (5)$$

其曲线如图 6 所示。

4.2 传感器测量精度实验

对测量系统完成标定以后,选用 1.4~9.4 mm 量块对测量系统进行精度测量实验,由于用于精度实验的厚度值与用于标定的厚度值不一样,更能说

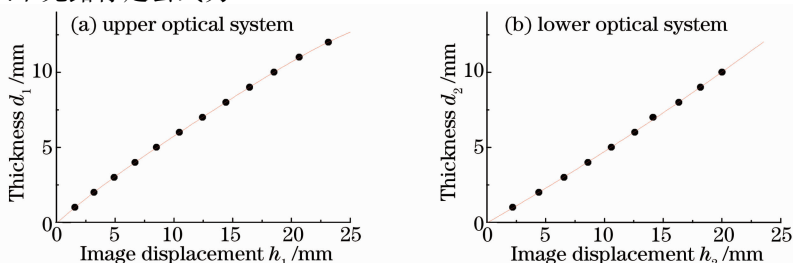


图 6 上下光路系统标定曲线

Fig. 6 Calibration curves of upper and lower optical system

明精度实验的有效性。测量时,对每个厚度的量块测量 5 组数据,每组 32 次,共 160 个数据,其测量结果如表 2 所示。从测量结果来看,其测量相对误差

最大值为 0.7071%,小于 1%,达到了油膜厚度传感器的精度要求。

表 2 1.4~9.4 mm 量块测量结果(单位: mm)

Table 2 1.4~9.4 mm gauge block measurement result (unit: mm)

Nominal value	1.4000	2.4000	3.4000	4.4000	5.4000	6.4000	7.4000	8.4000	9.4000
Average thickness	1.4099	2.4072	3.3953	4.3935	5.3873	6.4100	7.4257	8.4096	9.4344
Absolute error	0.0099	0.0072	-0.0047	-0.0065	-0.0127	0.0100	-0.0257	0.0096	0.0344
Standard deviation	0.0084	0.0069	0.0079	0.0061	0.0190	0.0160	0.0100	0.0525	0.1505
Relative error / %	0.7071	0.3000	0.1382	-0.1477	-0.2352	0.1563	-0.3473	0.1143	0.3660

5 结 论

针对海面溢油油膜厚度的测量,基于垂直入射式差分激光三角法原理,提出并研制了可机载投放的浮标式油膜厚度测量传感器。在设计并研制成功浮标系统和数据接收处理系统的基础上,完成了传感器的集成和调试,进行了水密、水压、姿态保持和随波性能试验。并使用 0 级陶瓷量块作为标准厚度物体,采用非线性拟合高次曲线的方法,上光路 4 次拟合曲线,下光路 2 次拟合曲线,对所研制的传感器进行了标定。利用 1.4~9.4 mm 不同厚度量块进行了精度测量实验,测量结果表明,其测量相对误差最大值为 0.7071%,达到了油膜厚度传感器的精度要求,说明研制样机的正确性和有效性。

参 考 文 献

- 1 Pelyushenko S A. Microwave radiometer system for the detection of oil slicks[J]. Spill Sci Technol Bull, 1995, 2(4): 249-254.
- 2 Sun C, Yu L, Sun Y, *et al.*. Scanning white-light interferometer for measurement of the thickness of a transparent oil film on water[J]. Appl Opt, 2005, 44(25): 5202-5205.
- 3 Hoge F E, Swift R N. Oil film thickness measurement using airborne laser-induced water raman backscatter[J]. Appl Opt, 1980, 19(19): 3269-3281.
- 4 Brown C E, Fingas M F. Development of airborne oil thickness measurements[J]. Mar Pollut Bull, 2003, 47(9): 485-492.
- 5 L Qieni, G Baozhen, Y Wenda, *et al.*. A method for measuring the thickness of transparent oil film on water surface with laser trigonometry[J]. Opt & Lasers in Eng, 2011, 49(1): 13-15.
- 6 Ge Baozhen, Lü Qieni, Wang Xiangnan, *et al.*. A Method for the Oil Spill Thickness Measurement on the Sea Surface with Laser Trigonometry [P]. China Patent: 200910068627X, [2010-8-18].
葛宝臻, 吕且妮, 王项南, 等. 基于差分激光三角法的海面溢油

油膜厚度测量方法[P]. 中国: 200910068627X, [2010-8-18].

- 7 Q Lü, L Lu, B Ge, *et al.*. Differential laser trigonometry for measuring the oil film thickness on water[J]. J Mod Opt, 2012, 59(11), 947-953.
- 8 Ge Baozhen, Liu Pengcheng, Sun Jingbin, *et al.*. Study of data acquisition and processing system of oil film thickness measurement in seawater[J]. Ocean Technology, 2011, 30(1): 32-36.
葛宝臻, 刘鹏程, 孙晶玢, 等. 海上油膜厚度测量数据采集与处理系统的研究[J]. 海洋技术, 2011, 30(1): 32-36.
- 9 Ge Baozhen, Sun Jingbin, Liu Pengcheng, *et al.*. Designing an optical set-up of differential laser triangulation for oil film thickness measurement on water[J]. Rev Sci Instrum, 2013, 84(1): 013105.
- 10 Wang Shaoqing, Zhuang Baohua, Zhang Jihua, *et al.*. The study of the linear calibration of laser triangulation displacement sensor [J]. Applied Laser, 1995, 15(3): 117-121.
王少清, 庄葆华, 张吉华, 等. 激光三角位移计线性标定的研究 [J]. 应用激光, 1995, 15(3): 117-121.
- 11 Guo Tao, Da Feipeng, Fang Xu. Calibration under small field of view[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0808001.
郭涛, 达飞鹏, 方旭. 小视场环境下的摄像机标定[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808001.
- 12 Zhang Qiong, Wang Zhiliang, Chi Jiannan, *et al.*. Calibration for gaze tracking system based on stereo[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0415002.
张琼, 王志良, 迟健男, 等. 基于平面镜面向双摄像机视线追踪系统的标定方法[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0415002.
- 13 Xue Junpeng, Su Xianyu, Dou Yunpu. A concentric circles and wedge grating-based camera self-calibration method[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0308002.
薛俊鹏, 苏显渝, 窦蕴甫. 基于同心圆光栅和楔形光栅的摄像机自标定方法[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0308002.
- 14 Spinola C, Vgquez M J M, Bohorquez A F, *et al.*. Calibration of thickness measurement instruments based on twin laser sensors isoline bilinear look up tables[C]. Budapest: Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC Proceedings of the 18th IEEE, 2001, 2: 1079-1083.

栏目编辑:何卓铭