

海水折射率对差分激光三角法油膜厚度测量精度的影响

耿云飞^{1,2} 陈曦^{3*} 金文³ 张惠群³ 邬海强⁴ 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

³天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072

⁴国家海洋技术中心, 天津 300112

摘要 针对海水折射率变化引起差分激光三角法溢油油膜厚度测量系统结果误差增大的问题, 理论分析了海水折射率变化对厚度测量值的影响机理, 研究了折射率变化与测量结果误差大小的关系。提出了基于二维曲面拟合的误差补偿方法。该方法通过采集不同厚度、不同折射率下的厚度测量值, 利用二次多项式曲面拟合建立测量误差、厚度测量值和折射率之间的函数关系, 根据测量值和折射率值, 就可得到误差补偿值, 进而实现对测量结果的补偿。通过对不同折射率、不同厚度陶瓷量块的补偿实验, 结果表明补偿后的厚度测量值更接近真值, 测量结果的误差显著降低。

关键词 测量; 误差补偿; 曲面拟合; 差分激光三角法; 油膜厚度测量

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0408004

Influence of Seawater Refractive Index on the Precision of Oil Film Thickness Measurement by Differential Laser Triangulation

Geng Yunfei^{1,2} Chen Xi³ Jin Wen³ Zhang Huiqun³ Wu Haiqiang⁴ Ge Baozhen^{1,2}

¹School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education, Tianjin 300072, China

³School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China

⁴National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China

Abstract The analysis on the seawater refractive index which increases the error of oil film thickness measured by differential laser triangulation are taken to discover the relationship between the change of refractive index and error. Accordingly a method based on two-dimensional curved surface fitting is proposed to compensate the error. The data of thickness are measured in the water of different refractive indexes and the quadratic polynomial curved surface fitting is adopted to formulate the error, thickness and refractive index. Then the measurement of thickness is compensated by using the above the formula and the refractive index. The experiments taken on different refractive indexes show the thickness measurement compensated is closer to the true value and the error is minimized.

Key words measurement; error compensation; surface fitting; differential laser trigonometry; oil film thickness measurement

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 120.4820

收稿日期: 2014-11-06; 收到修改稿日期: 2014-11-28

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(201305002-2)

作者简介: 耿云飞(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: 386297378@qq.com

导师简介: 葛宝臻(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电检测与信息处理、激光粒子测量和激光三维彩色数字化技术等方面的研究。E-mail: gebz@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: chenxi@tju.edu.cn

1 引 言

激光三角法是非接触式溢油油膜厚度测量的主要方法^[1],该方法采用上、下两个三角光路组成差分系统,上光路测量油膜上表面与基准面的距离,下光路测量油膜下表面与基准面的距离,通常采用标定方法分别得到上、下光路的距离值与像移的关系,上、下光路的测量值相减就可得到油膜厚度。本课题组在研究斜射式差分测量系统的基础上^[2-4],提出基于直射式双光路差分激光三角法的海面溢油油膜厚度测量方法^[5-6],并研制了浮标式油膜厚度测量传感器样机^[5],在实验室环境下完成了传感器的测量范围和测量精度实验验证^[7]。

然而在实际海洋工况条件下,不同海域海水折射率不同,同一海域的不同季节,由于温度变化,其折射率也会变化^[8-10]。由于测量系统的下光路要经过海水后成像,海水的折射率不同,光线的成像路径就不同,像点位置就不同。而测量系统的标定只能在某一确定折射率的水(如在实验室环境下折射率为1.3332的自来水)中进行,由于测量环境海水折射率和标定时折射率不一致,必然会产生测量误差。为此,本文从理论分析和实验验证两方面,研究测量环境海水折射率与标定介质折射率不一致时,折射率变化与测量值的关系,找出折射率变化对测量精度影响的规律,在此基础上,寻找一种有效的误差补偿方法,通过对测量值进行补偿来提高海面溢油油膜厚度的测量精度,而且所建立的补偿方法对测量范围内的、不同折射率海水中的厚度测量值都能进行补偿。

2 直射式差分激光三角法油膜厚度测量原理

图1(a)所示为直射式差分激光三角法油膜厚度测量原理图,测量系统由上、下光路组成,光路结构满足Scheimpflug条件^[11-12]。上光路位于空气中,测量油膜上表面距基准面的距离 d_1 ;下光路一部分位于保护腔的空气中,另一部分位于海水中,两部分中间由窗口玻璃分割,下光路测量油膜下表面距基准面的距离 d_2 ,则油膜厚度 d 的测量公式为

$$d = d_1 - d_2 . \tag{1}$$

对于上光路,根据直入射三角法原理, d_1 与 h_1 的关系为^[12]

$$d_1 = \frac{uh_1 \sin \alpha_1}{v \sin \theta_1 + h_1 \sin(\alpha_1 + \theta_1)} , \tag{2}$$

式中 u 为基准点物距, v 为基准点像距, θ_1 为激光束与透镜主轴之间的夹角, α_1 为CCD1与成像透镜光轴之间的夹角。

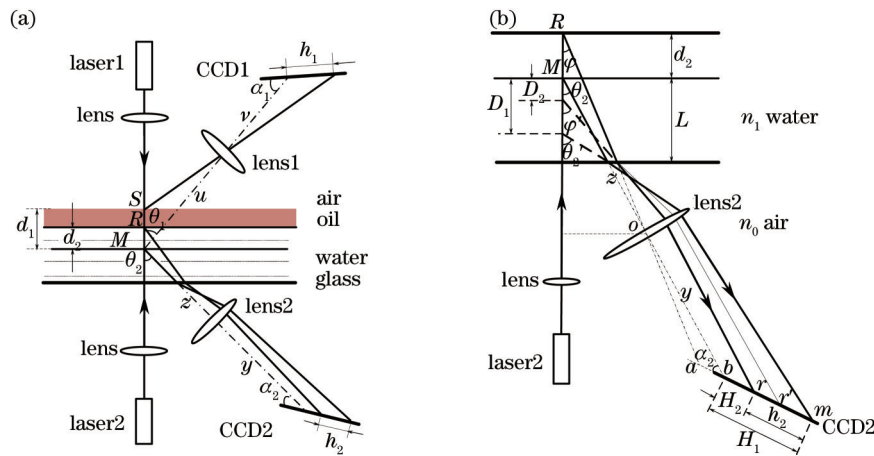


图1 (a) 油膜厚度测量原理示意图; (b) 下光路成像关系图

Fig.1 (a) Schematic of oil film thickness measurement; (b) schematic of lower optical system imaging

对于下光路,其详细成像关系如图1(b)所示,由于与文献[5]中的光路有些不同,需重新推导下光路公式。激光器发出的光垂直入射到基准面 M 点,当介质为空气,散射光经成像透镜成像于CCD2上 b 点。当介质为水,由于窗口玻璃较薄,不考虑其影响,仅考虑水的折射,成像点由空气中 b 点移至 m 点,移动距离 H_1 。对于油膜下表面 R 点,在空气中成像于CCD2上 a 点,在水中成像于CCD2上 r 点。 θ_2 为激光器光轴与成像透

镜光轴之间的夹角, α_2 为 CCD2 靶面与透镜光轴的夹角, φ 为 R 点散射光线与激光器光轴的夹角, θ'_2 、 φ' 分别为基准点 M 和油膜下表面 R 发出的散射光在水-空气界面折射后, 其折射光线的反向延长线与激光器光轴的夹角, D_1 、 D_2 分别为 M 点和 R 点等效在空气中的位置与基准面的距离, MO 、 Ob 分别为基准点物距和像距, 用 z 和 y 表示, L 为基准面到窗口玻璃的距离, n_1 为水介质折射率, n_0 为空气折射率。

根据折射定律有:

$$n_1 \sin \theta_2 = n_0 \sin \theta'_2, \quad (3)$$

$$n_1 \sin \varphi = n_0 \sin \varphi'. \quad (4)$$

根据几何关系有:

$$L \tan \theta_2 = (L - D_1) \tan \theta'_2, \quad (5)$$

$$(L + d_2) \tan \varphi = (L - D_2) \tan \varphi'. \quad (6)$$

根据三角法公式有:

$$H_1 = \frac{D_1 y \sin \theta_2}{z \sin \alpha_2 - D_1 \sin(\alpha_2 + \theta_2)}, \quad (7)$$

$$H_2 = \frac{D_2 y \sin \theta_2}{z \sin \alpha_2 - D_2 \sin(\alpha_2 + \theta_2)}. \quad (8)$$

根据三角关系有:

$$\sin \varphi = \frac{z \sin \theta_2}{\sqrt{(z \sin \theta_2)^2 + (z \cos \theta_2 + d_2)^2}}. \quad (9)$$

由(3)式和(4)式导出:

$$\frac{\tan \theta'_2}{\tan \theta_2} = \frac{n_1 \cos \theta_2}{\sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \theta_2}}, \quad (10)$$

$$\frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi} = \frac{n_1 \cos \varphi}{\sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (11)$$

将(10)式代入到(5)式中整理得

$$D_1 = L \left[1 - \frac{\sqrt{1 - (n_1 \sin \theta_2)^2}}{n_1 \cos \theta_2} \right]. \quad (12)$$

由(7)、(8)、(12)式以及 $h_2 = H_1 - H_2$ 得到 D_2 的表达式为

$$D_2 = \frac{z \sin \alpha_2 \left\{ L \left[1 - \frac{\sqrt{1 - (n_1 \sin \theta_2)^2}}{n_1 \cos \theta_2} \right] [y \sin \theta_2 + h_2 \sin(\alpha_2 + \theta_2)] - zh_2 \sin \alpha_2 \right\}}{Lh_2 \sin^2(\alpha_2 + \theta_2) \left[1 - \frac{\sqrt{1 - (n_1 \sin \theta_2)^2}}{n_1 \cos \theta_2} \right] - zh_2 \sin \alpha_2 \sin(\alpha_2 + \theta_2) + zy \sin \theta_2 \sin \alpha_2}. \quad (13)$$

由(6)、(9)、(11)式整理得

$$d_2 = (L - D_2) \frac{n_1}{\sqrt{1 + (1 - n_1^2) \left(\frac{z \sin \theta_2}{z \cos \theta_2 + d_2} \right)^2}} - L. \quad (14)$$

将(13)式代入到(14)式中得到

$$d_2 = \left\{ L - \frac{z \sin \alpha_2 \left\{ L \left[1 - \frac{\sqrt{1 - (n_1 \sin \theta_2)^2}}{n_1 \cos \theta_2} \right] [y \sin \theta_2 + h_2 \sin(\alpha_2 + \theta_2)] - zh_2 \sin \alpha_2 \right\}}{Lh_2 \sin^2(\alpha_2 + \theta_2) \left[1 - \frac{\sqrt{1 - (n_1 \sin \theta_2)^2}}{n_1 \cos \theta_2} \right] - zh_2 \sin \alpha_2 \sin(\alpha_2 + \theta_2) + zy \sin \theta_2 \sin \alpha_2} \right\} \times$$

$$\frac{n_1}{\sqrt{1+(1-n_1^2)\left(\frac{z \sin \theta_2}{z \cos \theta_2 + d_2}\right)^2}} - L. \quad (15)$$

由(15)式可见,当系统结构确定后, $\theta_2, z, y, \alpha_2, L$ 为常数, d_2 与 h_2, n_1 是数学函数关系, 由于公式十分复杂, 不容易得到解析解, 所以, 通常是在某一折射率下, 采用标定的方法来确定 d_2 与 h_2 的关系。

3 海水折射率变化引起测量误差的原因

由于只有下光路经过海水成像, 所以只讨论折射率对下光路测量的影响。测量系统研制过程中, 首先需要标定, 在某一折射率(如 $n_1=1.3332$)的水中, 第一步标定出基准点在 CCD2 上的像点位置 m , 然后, 改变量块的厚度, 通过测量不同厚度的量块在 CCD2 上的像点位置 r , 求出对应的像移 h_2 , 通过拟合方法得到 d_2 与 h_2 的数学关系。实际测量中, 只测量了 CCD2 上的像点位置 r , 与标定的基准点位置 m 相减, 得到像移 h_2 , 根据标定的 d_2 与 h_2 的关系, 就可得到测量值 d_2 。若介质的折射率改变, 同一厚度物体, 由于折射的影响, 测量点像点会移动, 但基准点不变, 因而, 像移 h_2 会因介质折射率不同而变化, 导致测量值 d_2 产生误差。对应于图 1(b) 中同一厚度, 当介质折射率由 n_1 变为 n_2 时 ($n_2 > n_1$), 基准位置的成像点 m 保持不变, 测量点光斑由 r 变成 r' 。所以, CCD2 上 H_1 保持不变, h_2 的变化情况可根据(14)式和(8)式分析得到, 在(14)式中, D_2 对 n_1 求导有:

$$\Delta D_2 = (L + d_2) \left[\frac{\sqrt{1+(1-n_1^2)k}}{n_1^2} + \frac{k}{\sqrt{1+(1-n_1^2)k}} \right] \Delta n_1, \quad (16)$$

式中 $k = \left(\frac{z \sin \theta_2}{z \cos \theta_2 + d_2}\right)^2$, 令 $f(n_1) = (L + d_2) \left[\frac{\sqrt{1+(1-n_1^2)k}}{n_1^2} + \frac{k}{\sqrt{1+(1-n_1^2)k}} \right]$, 可以看出 $f(n_1) > 0$, 则当 $\Delta n_1 > 0$ 时,

$\Delta D_2 > 0$, 说明折射率由 n_1 增大为 n_2 后, 同一厚度位置对应的 D_2 变大, 则由(8)式可知 H_2 变大, 因为 $h_2 = H_1 - H_2$, 所以 h_2 变小。将其代入到折射率 1.3332 中的标定方程必然导致测量值 d_2 产生误差。此外, 由(16)式可以看出, 折射率的变化量越大, D_2 的变化量越大, 则 h_2 的改变量越大, 相应的厚度测量值的误差也越大。

4 不同折射率厚度测量实验

4.1 标定过程及结果

通过改变盐水浓度来模拟海水折射率的变化, 实验系统如图 2 所示, 包括半导体激光器光源、成像透镜、CCD、样品池和计算机等部分。依据文献[5]给出的标定方法, 用于标定的标准厚度 d_2 与像移 h_2 的原始数据如表 1 所示, 标定介质的折射率为 1.3332。

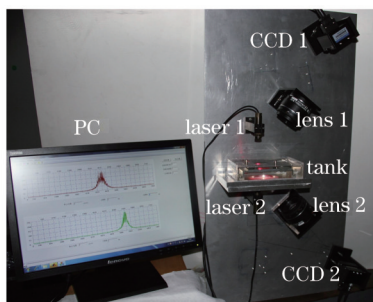


图 2 差分激光三角法油膜厚度测量系统

Fig.2 System of oil film thickness measurement by differential laser trigonometry

表 1 下光路标定原始数据(单位: mm)

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

d_2	0.300	0.500	1.000	1.900	2.900	3.900	4.900	5.900	6.900	7.900	8.900
h_2	0.695	1.168	2.187	4.129	6.224	8.284	10.256	12.245	14.109	16.087	18.002

对表 1 数据进行多项式拟合^[5], 得到标定曲线方程为

$$d_2 = -1.4 \times 10^{-5} h_2^4 + 4.6 \times 10^{-4} h_2^3 - 2.4 \times 10^{-3} h_2^2 + 0.47 h_2 - 0.0341. \quad (17)$$

4.2 不同折射率、不同厚度陶瓷量块测量结果与分析

在折射率为 1.3365、1.3469、1.3580、1.3704、1.3793 的盐水中分别测量 0、2、4、6、8 mm, 5 个厚度的陶瓷量块, 每个厚度采集 32 个数据, 经 3σ 准则^[13]剔除粗大误差后得到的测量结果如表 2 所示, 其中 T 为厚度测量值, AE 为绝对误差, RE 为相对误差。由表 2 数据可见, 同一厚度, 随着折射率的增加, 测量值减小, 误差增大。

表 2 不同折射率下的不同厚度量块测量结果(单位: mm)

Table 2 Different thickness gauge block measurement results under different refractive indexes (unit: mm)

Nominal value		Refractive index				
		1.3365	1.3469	1.3580	1.3704	1.3793
0.000 (reference position)	T	-0.115	-0.421	-0.741	-1.142	-1.344
	AE	-0.115	-0.421	-0.741	-1.142	-1.344
2.000	T	1.879	1.534	1.207	0.813	0.589
	AE	-0.121	-0.466	-0.793	-1.187	-1.411
	RE/%	-6.1	-23.3	-39.7	-59.4	-70.6
4.000	T	3.875	3.516	3.128	2.750	2.467
	AE	-0.125	-0.484	-0.872	-1.250	-1.533
	RE/%	-3.1	-12.1	-21.8	-31.3	-38.3
6.000	T	5.883	5.501	5.113	4.657	4.406
	AE	-0.117	-0.499	-0.887	-1.343	-1.594
	RE/%	-2.0	-8.3	-14.8	-22.4	-26.6
8.000	T	7.865	7.477	7.088	6.680	6.340
	AE	-0.135	-0.523	-0.912	-1.320	-1.660
	RE/%	-1.7	-6.5	-11.4	-16.5	-20.8

为了便于直观观察折射率变化对测量结果的影响, 将表 2 数据用曲线图表示。当折射率固定时, 测量结果如图 3(a) 所示, 横坐标为厚度值, 纵坐标为绝对误差值; 当厚度固定时, 测量结果如图 3(b) 所示, 横坐标为折射率, 纵坐标为绝对误差值。由图 3 可见, 同一厚度, 随着折射率增大, 误差也随之增大, 且该误差使厚度测量值向减小的方向移动。不同厚度, 厚度越大, 其误差的变化率也越大, 而且折射率的变化比厚度变化对测量结果的影响更显著。

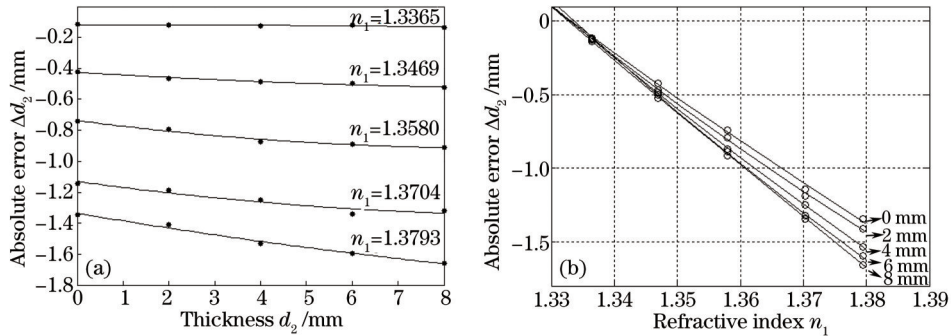


图 3 误差随厚度和折射率变化曲线。(a) 厚度; (b) 折射率

Fig.3 Curves of absolute error with the thickness and refractive index. (a) Thickness; (b) refractive index

5 误差补偿

由上面的分析可知, 折射率变化产生的误差与厚度 d_2 和折射率 n_1 都有关, 即 $\Delta d_2 = f(d_2, n_1)$, 据此提出一种基于二维曲面拟合的误差补偿方法。该方法在 i 种不同折射率的盐水中测量 j 种不同标准厚度的量块, 得到一组测量值 d_2^j , 将测量值与量块标称值相减得到一组误差值 Δd_2^j , 依据 Δd_2^j 、 d_2^j 、 n_1^i 作二次多项式曲面拟合, 得到拟合公式 $\Delta d_2 = f(d_2, n_1)$ 。在实际应用时将测量值 d_2^m 与折射率代入拟合公式求得误差值 Δd_2^m , 修正

值与误差值数值相等而符号相反^[14],用 Δd_2^c 表示修正值,将其与测量值 d_2^m 相加就可求得补偿后的厚度 d_2^{cp} ,其关系可描述为

$$d_2^{cp} = d_2^m + \Delta d_2^c. \quad (18)$$

5.1 误差曲面的拟合

采用 Matlab 曲面拟合工具箱对表 2 中的 25 个数据进行二次多项式曲面拟合,拟合结果的均方根误差^[15] (RMSE)为 0.0187,其拟合方程为

$$\Delta d_2 = -154.242 - 1.101d_2 + 199.150n_1 - 0.0011d_2^2 + 0.832d_2n_1 - 62.6004n_1^2. \quad (19)$$

5.2 补偿效果验证

为了验证补偿方法的有效性,选择的厚度值和折射率与用于标定和误差拟合的都不一样,折射率为 1.3389, 1.3450, 1.3550, 1.3656, 1.3737, 厚度值为 0.4, 1.4, 3.4, 5.4, 7.4 mm,其厚度测量值如表 3 所示。

表 3 下光路不同折射率盐水中厚度测量值(单位: mm)

Table 3 Thickness in different salt solutions of the lower optical system (unit: mm)

Nominal value		Refractive index					Mean absolute error
		1.3389	1.3450	1.3550	1.3656	1.3737	
0.400	T	0.225	0.045	-0.263	-0.557	-0.807	—
	AE	-0.175	-0.355	-0.663	-0.957	-1.207	-0.671
1.400	T	1.201	1.027	0.695	0.408	0.142	—
	AE	-0.199	-0.373	-0.705	-0.992	-1.258	-0.705
3.400	T	3.199	3.014	2.681	2.348	2.071	—
	AE	-0.201	-0.386	-0.719	-1.052	-1.329	-0.737
5.400	T	5.205	4.98	4.645	4.266	4.000	—
	AE	-0.195	-0.420	-0.755	-1.134	-1.400	-0.781
7.400	T	7.227	6.976	6.613	6.259	5.958	—
	AE	-0.173	-0.424	-0.787	-1.141	-1.442	-0.793

将表 3 中的厚度测量值和折射率代入(19)式,得到对应每一个厚度、折射率的误差值,进而求得修正值,将修正值与厚度测量值相加得到补偿后的厚度值,结果如表 4 所示。比较表 3 和表 4 数据可见,补偿前,厚度

表 4 二次多项式曲面拟合补偿结果(单位: mm)

Table 4 Compensated results by quadratic polynomial surface fitting (unit: mm)

Nominal value		Refractive index					Mean absolute error
		1.3389	1.3450	1.3550	1.3656	1.3737	
0.400	T	0.407	0.414	0.401	0.398	0.358	—
	AE	0.007	0.014	0.001	-0.002	-0.042	-0.004
1.400	T	1.394	1.413	1.383	1.398	1.348	—
	AE	-0.006	0.013	-0.017	-0.002	-0.052	-0.013
3.400	T	3.409	3.428	3.415	3.401	3.354	—
	AE	0.009	0.028	0.015	0.001	-0.046	0.001
5.400	T	5.422	5.412	5.415	5.373	5.351	—
	AE	0.022	0.012	0.015	-0.027	-0.049	-0.005
7.400	T	7.443	7.418	7.410	7.413	7.370	—
	AE	0.043	0.018	0.010	0.013	-0.030	0.0108

测量值的绝对误差较大,平均绝对误差最大值达到-0.793 mm,而补偿后绝对误差明显减小,平均绝对误差最大值仅为-0.013 mm。

6 结 论

通过理论分析和实验验证,差分激光三角法溢油油膜厚度测量系统因被测环境海水折射率与标定介质

折射率的变化而产生较大误差,折射率变化量越大,测量结果误差越大,同时,测量厚度不一样,测量误差也不一样。通过二维曲面拟合的方法进行误差补偿,实验表明,该补偿方法对不同折射率的不同厚度值均有效。实际测量时,只要通过海水取样测得其折射率,根据该方法,就可对测量值进行补偿,因此可有效减少海水折射率变化对厚度测量精度的影响,提高了差分激光三角法溢油油膜厚度测量系统的适应性。

参 考 文 献

- 1 Li Ying, Fang Jinbiao, Liu Yu, *et al.*. The measurement system technology of offshore oil film thickness[J]. *Marine Environmental Science*, 2014, (5): 777-780.
李 颖, 房金彪, 刘 瑀, 等. 海上油膜厚度测量系统的研究[J]. *海洋环境科学*, 2014, (5): 777-780.
- 2 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.
- 3 Lü Qieni, Ge Baozhen, Yao 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.
- 4 Qieni Lü, Lin Lu, Baozhen Ge, *et al.*. Differential laser trigonometry for measuring the oil film thickness on water[J]. *J Mod Opt*, 2012, 59(11): 947-953.
- 5 Wu Di, Lü Qieni, Ge Baozhen. Development of oil film thickness sensor based on buoy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0108004.
吴 颀, 吕且妮, 葛宝臻. 浮标式油膜厚度测量传感器的研制[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0108004.
- 6 Wu Di, Qieni Lü, Lin Lu, *et al.*. Laser image spot processing for sea oil film thickness measurement[J]. *J Mod Opt*, 2014, 61(9): 676-682.
- 7 Wu Di, Lü Qieni, Chen Xi, *et al.*. Analysis on measurement range and precision of the oil film thickness measurement sensor based on differential laser trigonometry[J]. *Journal of Tianjin University (Science Technology)*, 2013, 46(11): 998-1002.
吴 颀, 吕且妮, 陈 曦, 等. 差分激光三角法油膜厚度测量传感器的测量范围与精度分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2013, 46(11): 998-1002.
- 8 Austin R W, Halikas G. *The Index of Refraction of Seawater*[R]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 1976.
- 9 Quan X, Fry E S. Empirical equation for the index of refraction of seawater[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(18): 3477-3480.
- 10 Li Guoxiang, Wang Shanshan, Yang Hongjuan, *et al.*. Study of seawater salinity sensor based on embedded microfiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 050603.
李国祥, 王姗姗, 杨红娟, 等. 嵌入式微纳光纤环形腔的海水盐度传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 050603.
- 11 Wang Xiaojia, Gao Jun, Wang Lei. Survey on the laser triangulation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(S2): 601-604.
王晓嘉, 高 隽, 王 磊. 激光三角法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(S2): 601-604.
- 12 Xiong Zhiyong, Zhao Bin. Inner hole range-finding sensor with laser triangulation based on trapezoid prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1212001.
熊志勇, 赵 斌. 基于梯形棱镜的激光三角法内孔测距传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1212001.
- 13 Fei Yetai. *Error Theory and Data Processing*[M]. Beijing: China Machine Press, 2010. 44-50.
费业泰. *误差理论与数据处理*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. 44-50.
- 14 Yang Yunjie, Tian Qingguo, Ge Baozhen. Correction technique for joint error of multi-sensor point cloud[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0314002.
杨玉杰, 田庆国, 葛宝臻. 多传感器点云拼接误差的修正方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0314002.
- 15 Zhou You, Wang Qing, Liu Shijie. A method to modify systematic errors in the stitching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 051202.
周 游, 王 青, 刘世杰. 一种修正子孔径拼接中系统误差的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 051202.

栏目编辑: 何卓铭