

模型位姿变化对荧光油膜测厚精度的影响

陈博雯¹, 黄健¹, 张征宇^{2*}¹电子科技大学航空航天学院, 四川 成都 611731;²中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000

摘要 基于紫外诱导荧光的油膜厚度测量方法已被广泛应用于风洞油流实验,但在动态风洞实验中,承载荧光油膜的模型的位姿变化将会影响油膜厚度测量的精度。在紫外激发光源一次照明与油膜直接成像场景中,对模型位姿变化带来的成像荧光强度误差进行了理论及实验分析。研究了当被测模型发生平移和倾斜时,模型表面的辐照特性、接收荧光强度及成像接收荧光强度的变化,并利用成像荧光强度误差来表征油膜厚度测量精度。分析结果表明,当模型平移时,油膜厚度测量误差与平移距离有关,平移距离越大,误差越大。当模型小角度($-4^{\circ}\sim 4^{\circ}$)倾斜时,油膜厚度测量的相对误差小于 1%。

关键词 测量; 紫外诱导荧光; 荧光强度; 油膜测厚; 模型位姿变化; 误差分析

中图分类号 O432.1+2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2312004

Influence of Model Pose Change on Accuracy of Fluorescence Oil Film Thickness Measurement

Chen Bowen¹, Huang Jian¹, Zhang Zhengyu^{2*}

¹ School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

² China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China

Abstract The method of oil film thickness measurement based on ultraviolet-induced fluorescence technology has been widely used in wind tunnel oil flow tests. However, pose change of the model bearing the fluorescent oil film will affect the accuracy of oil film thickness measurement in dynamic wind tunnel tests. In the scene of primary illumination of ultraviolet excitation light source and direct imaging of oil film, the error in the imaging fluorescence intensity caused by the model pose change is analyzed theoretically and experimentally. The changes in the radiation characteristics, received fluorescence intensity, and imaging received fluorescence intensity of the model surface are investigated when the measured model is translated or tilted. The accuracy of oil film thickness measurement is represented by the error of the imaging fluorescence intensity. The analysis results show that the error in the oil film thickness measurement depends on the translation distance, and a longer translation distance results in a larger error when the model translates. The relative error of oil film thickness measurement is less than 1% when the model takes on a small-angle tilt ($-4^{\circ}\sim 4^{\circ}$).

Key words measurement; ultraviolet-induced fluorescence; fluorescence intensity; oil film thickness measurement; model pose change; error analysis

OCIS codes 120.1880; 300.2530; 240.7040; 140.3290

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-05-18; 录用日期: 2021-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(11872069)

通信作者: *zhang_zy@189.cn

1 引言

当紫外光或波长较短的可见光照射到某些物质时,这些物质会发射出各种颜色和不同强度的可见光。然而,当光源停止照射时,光线会随之消失。其中,在激发光源诱导下产生的光被称为荧光^[1],相关的物质被称为荧光物质。荧光物质被激发光源照射后发出荧光的现象被称为诱导荧光。诱导荧光技术可利用荧光的激发特性进行物体表面的流动测量,其具有显示直观、成本低的优点。

诱导荧光技术已被广泛应用于生物^[2]、化学^[3]、环境^[4]、食品^[5]等多个领域中。除此之外,诱导荧光技术还被用于内燃机可视化研究^[6-7]、风洞中油流法流场显示技术研究^[8-10]、火焰场结构特性研究^[11-13]等。基于诱导荧光的油膜厚度测量技术在这些应用与研究中扮演着重要的角色。陆宵露等^[14]将激光作为诱导荧光激发光源,通过标定实验得到了将荧光信号转化为油膜厚度的方法,并对石英平板上的油膜厚度进行了测量。结果表明,采用诱导荧光显示法测量油膜厚度是可行且有效的。Schubring 等^[15-16]提出了一种平面激光诱导荧光(PLIF)的方法,可实现向上的空气-水环形流动中液膜的直接可视化,进而实现了对液膜厚度的测量。Hidrovo 等^[17]提出了发射再吸收激光诱导荧光(ERLIF)的油膜厚度测量方法,并利用两种荧光染料,对厚度为 5~40 μm 的薄膜进行了测量。结果表明,该方法的测量精度可达 1%。崔永强等^[18]提出了一种基于激光诱导荧光(LIF)检测技术的反演算法,可用于测量较厚的油膜(油膜厚度不小于 20 μm),并对不同厚度的原油和白油的混合油(体积分数比例为 1:50)进行了测量。结果表明,在混合油膜厚度不大于 800 μm 时,该方法测量精度较高。

测量精度是衡量基于诱导荧光的油膜厚度测量技术与改进效果的重要标准。在实际应用中,测量精度与测量条件和测量过程有关。Hidrovo 等^[19]研究了荧光强度与激发强度的非线性行为对发射再吸收激光诱导荧光误差的影响,并提出了一种基于幂律的荧光强度非线性近似方法来提高测量精度。Häber 等^[20]研究了全反射现象对液膜厚度测量的影响,研究结果表明,全反射现象会导致均匀液膜厚度的测量结果偏离实际值约 30%。

在静态测量中,承载油膜的模型总是固定不变的。然而,在动态风洞实验中,为了有效检验模型的气动特性,被测模型将发生一定程度的平移、偏转等

姿态变化,这也会引起测量误差。本文基于风洞中受激荧光油膜的厚度测量模型,进行了模型位姿变化对紫外诱导荧光油膜厚度测量结果影响的理论误差分析和实验研究,这样不仅可以减小或消除测量误差,让测量结果更加精确,还可以促进诱导荧光技术更好地应用于风洞实验测量研究。

2 基本原理

光在物质中传播时,存在被吸收的现象。根据比尔-朗伯吸收定律^[21],随着光进入物质深度的增加,光的强度在指数式衰减。在特定照射光波长下,每个像素对应的薄膜微元的横截面积为 A 、厚度为 h ,则荧光辐射强度^[17]为

$$F = I_0 \epsilon C \phi A h = I_0 \epsilon C \phi A h \exp(-\epsilon C d), \quad (1)$$

式中: I_0 为距离液体薄膜表面 d 处的微元接收到的激发光辐照强度; $I_0 \epsilon C$ 为单位面积上荧光物质吸收的总能量; ϕ 为量子效率,表示激发的荧光能量与吸收的激发光源能量的比例; I_0 为液膜表面(即 $d = 0$)处的光辐照强度; C 为液膜中荧光物质的浓度; ϵ 为荧光物质的分子吸收系数,该系数与波长相关。在风洞中利用诱导荧光显示的方法进行油膜厚度测量,此时油膜的厚度通常在微米量级,故辐照光源在油膜中传输时几乎不会被吸收。因此,可将(1)式中的荧光辐射强度简化为

$$F \approx I_0 \epsilon C \phi A h, \quad (2)$$

由(2)式可知,在固定的受激荧光成像系统中,当其他条件相同时,薄膜微元的荧光辐射强度 F 与薄膜微元的厚度 h 成正比。因此,在理想情况下,当标定荧光辐射强度与厚度的比例系数后,根据静止模型表面上油膜的荧光成像强度便可测量出相应的油膜厚度。同时,可利用荧光成像强度误差来表征油膜厚度的测量精度。

在传统油流实验中,通常将激光作为诱导荧光激发光源,但是紫外激光器的价格较为昂贵,此时成本较高。由于紫外发光二极管(LED)具有结构简单、能量效率高、成本较低等优点,故在风洞实验中将紫外 LED 作为激发光源进行油膜厚度测量,测量模型如图 1 所示。其中,紫外 LED 线阵对称均匀地摆放在模型和相机之间,模型与相机所在平面与 LED 阵列所在平面相互垂直,并且相机和 LED 阵列的位置固定不变。在测量过程中,紫外 LED 阵列在垂直于模型表面方向上进行均匀照明。当承载荧光油膜的模型位姿相对初始静止状态发生变化时,油膜厚度的测量将会产生误差。其中,模型位姿变

化主要包括模型位置的平移(即模型靠近或远离 LED 光源)和倾斜。

根据(2)式,在固定的受激荧光成像系统中,当承载荧光油膜的模型位姿发生平移或倾斜时,虽然油膜和荧光物质的物理化学特性不发生变化,但是液膜表面处的紫外辐照强度 I_s 、每个像素对应的薄膜微元的横截面积 A 将会发生变化。 I_s 和 A 的变化将引起荧光物质接收到的紫外照射能量以及荧光成像接收能量的改变,进而导致成像荧光强度的结果产生误差。

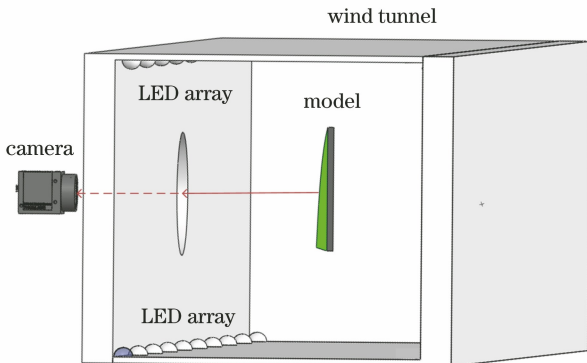


图 1 风洞中受激荧光油膜测厚模型

Fig. 1 Model of stimulated fluorescence oil film thickness measurement in wind tunnel

3 误差分析

3.1 模型表面的辐照特性

在风洞中,当利用紫外诱导荧光技术测量油膜厚度时,由于荧光辐射强度与液膜表面处的激发光源辐照强度是相关的,因此紫外 LED 光源辐照强度不均匀会使油膜厚度的测量结果产生误差。在实际情况中,单个 LED 光源为非理想的朗伯光源,根据朗伯余弦定理^[22],其光强分布为视角余弦的多次方函数,即

$$I_1 = I_0 \cos^m \varphi, \quad (3)$$

式中: I_0 为零视角方向上的轴上光强; φ 为光线相对于光强峰值方向的张角,也称为视角; m 为 LED 芯片的特定出厂参数,与生产工艺相关。令视角为 φ 的球带上,LED 芯片位于坐标原点处, l_1 为 I_0 的位置与坐标原点之间的距离,因此

$$dP_0 = I_0 \cos^m \varphi \cdot 2\pi l_1^2 \sin \varphi d\varphi, \quad (4)$$

式中: $2\pi l_1^2 \sin \varphi d\varphi$ 是视角为 φ 、角度微元为 $d\varphi$ 的球带的面积。对(4)式进行积分可得

$$P_0 = \int_0^{\pi/2} I_0 \cos^m \varphi \cdot 2\pi l_1^2 \sin \varphi d\varphi, \quad (5)$$

式中: P_0 为 LED 芯片的功率。因此,半径为 l_1 的球面的总辐射功率与 LED 光源的功率相等,则零视角方向上的轴上光强为

$$I_0 = \frac{(m+1)P_0}{2\pi l_1^2}. \quad (6)$$

对于非相干 LED 光源线阵,任意一点上的光强都等于所有 LED 单体的线性叠加。当线阵中采用同样性能的 LED 光源时,LED 线阵光强的空间分布为

$$I_{s1}(\varphi) = \frac{(m+1)P_0}{2\pi l_1^2} \sum_{k=1}^N \cos^m \varphi_k, \quad (7)$$

式中: φ_k 为第 k 个 LED 光源相对于光强峰值方向的张角; N 为 LED 光源总个数。令单个 LED 光源与光强峰值方向的最小张角为 φ_0 ,相邻两个 LED 相对于模型的张角为 $\Delta\varphi$,根据几何关系可得 $\varphi_k = \arctan(\tan \varphi_0 \pm k \tan \Delta\varphi)$,则(7)式中 LED 阵列的合成光强分布可转化为

$$I_{s1} = \frac{(m+1)P_0}{2\pi l_1^2} \times \sum_{k=1}^N \cos^m [\arctan(\tan \varphi_0 \pm k \tan \Delta\varphi)], \quad (8)$$

由(8)式可知,在单体 LED 光源参数确定的情况下,LED 阵列的合成光强分布与 $\Delta\varphi$ 和 φ_0 相关,也即与 LED 阵列的排列方式和模型到 LED 线阵的距离 l_1 相关。

在理想情况下,平行于模型表面任意位置上的紫外光辐照强度都是均匀的。然而,在真实系统中往往存在辐照强度不均匀的现象。根据图 1,将两列 LED 线阵对称均匀地摆放在距离油膜平面 l_1 位置处。利用(8)式分析在特定的 LED 阵列排列方式及模型到 LED 线阵距离下,油膜平面的合成光强分布及均匀性,结果如图 2 所示。此时, $m=1, \varphi_0=30^\circ, \Delta\varphi=30^\circ$ 。

由图 2 可以看出,当紫外光直接照射到油膜上

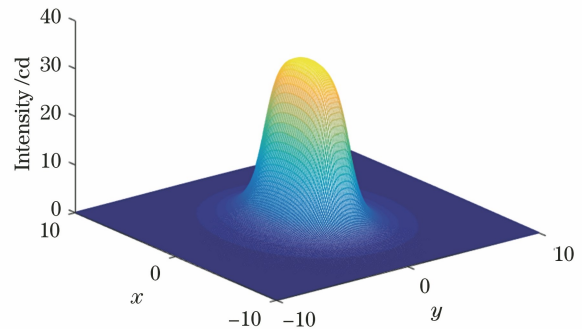


图 2 油膜平面的合成光强分布

Fig. 2 Synthetic light intensity distribution on oil film plane

时,油膜所在平面的整体维度上紫外光辐照强度是不均匀的,其光强分布为中心区域强,边缘区域弱。此外,还可以发现,在中心区域的小范围内,存在光照强度大且光照均匀性良好的区域。然而,在测量过程中,当油膜处于该区域外时,紫外光辐照强度的不均匀性将会造成油膜厚度测量结果产生误差。

3.2 模型位姿平移变化误差

当模型位姿发生平移变化时,模型将靠近或远离 LED 光源,模型表面的紫外光辐照强度会随之增大或减小,并且每个相机像素对应的薄膜微元面积也会随之减小或增大。当模型平移时,相机像素与油膜微元的对应关系如图 3 所示,其中 l_2 为成像物距, α 为油膜微元相对于单个像素的半张角。油膜微元接收到的总辐照功率为

$$P = I_{s1} \cdot S, \quad (9)$$

式中: S 为油膜微元的面积,其计算公式为

$$S = \pi(l_2\alpha)^2. \quad (10)$$

将油膜体积微元近似为点源,则每个油膜微元对应像素接收到的荧光强度为

$$I = \frac{P}{4\pi l_2^2}, \quad (11)$$

再根据(7)、(9)、(10)式,可将(11)式简化为

$$I = \frac{(m+1)\alpha^2 P_0}{8\pi l_1^2} \sum_{k=1}^N \cos^m \varphi_k. \quad (12)$$

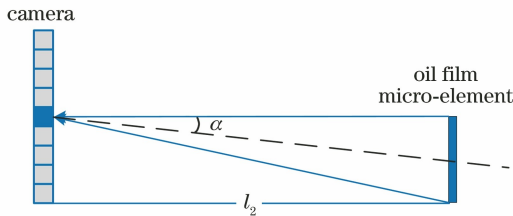


图 3 当模型平移时,相机像素与油膜微元的对应关系
Fig. 3 Corresponding relationship between camera pixels and oil film micro-elements when model is translated

由(12)式可知相机接收到的荧光强度不受物距 l_2 的影响,但其受光源到模型的距离 l_1 及 LED 光源相对于光强峰值方向的张角 φ_k 的影响。当模型靠近或远离 LED 光源时,若 LED 阵列摆放的距离相对于模型移动距离足够远,则移动前后 φ_k 的变化很小,即其带来的误差极其微小,因此可以认为

$$I \propto \frac{1}{l_1^2}, \quad (13)$$

由(13)式可知,荧光强度与直线照明距离的二次方成反比。对(13)式求微分可得

$$\frac{dI}{dl_1} \propto \frac{1}{l_1^3}, \quad (14)$$

由(14)式可知,荧光强度变化率与光源到模型距离的三次方成反比。

3.3 模型位姿倾斜变化误差

当模型位姿发生倾斜变化时,照明距离为 l_1 的位置上模型表面发生角度为 β 的倾斜。

在坐标为 x_1 的区域上,紫外辐照光功率密度为 $I_{s1}(l_1+x_1 \cdot \tan \beta)$,油膜微元接收到的总辐照功率为

$$P_1 = \frac{(m+1)P_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \cos^m \varphi_k \int_{-a/2}^{a/2} \frac{1}{(l_1+x_1 \cdot \tan \beta)^2} b dx = \frac{(m+1)P_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \cos^m \varphi_k \cdot \frac{ab}{l_1^2 - (a \cdot \tan \beta/2)^2}, \quad (15)$$

式中: a 为油膜微元在 x 方向上的尺度; b 为油膜微元在垂直于 x 方向上的尺度。油膜接收到的光功率的变化为

$$\Delta P_1 = \frac{ab(m+1)P_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \cos^m \varphi_k \cdot \left[\frac{1}{l_1^2} - \frac{1}{l_1^2 - (a \cdot \tan \beta/2)^2} \right]. \quad (16)$$

在油膜厚度测量系统中,照明距离通常在米量级,而每一个像素对应的油膜区域尺度通常在毫米量级,代入(16)式可知功率误差极其微小。因此,可以认为在倾斜条件下,油膜微元接收到的总辐照功率变化微小,其对油膜厚度测量结果几乎不产生影响。

在倾斜条件下,相机像素与油膜微元的对应关系如图 4 所示。将油膜体积微元近似为点源,物距为 l_2 的位置上每个油膜微元对应像素接收到的荧光强度为

$$I_1 = \frac{P_1}{4\pi} \int_{-a/2}^{a/2} \frac{1}{(l_2+x_1 \cdot \tan \beta)^2} dx = \frac{P_1}{4\pi} \cdot \frac{a}{l_2^2 - (a \cdot \tan \beta/2)^2}, \quad (17)$$

式中: P_1 可看作常数。油膜微元对应像素接收到的

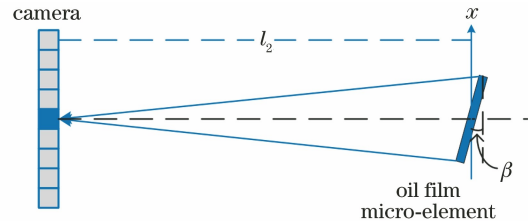


图 4 当模型倾斜时,相机像素与薄膜微元的对应关系
Fig. 4 Corresponding relationship between camera pixels and oil film micro-elements when model is tilted

荧光强度的变化为

$$\Delta I_1 = \frac{aP_1}{2\pi} \left[\frac{1}{l_2^2} - \frac{1}{l_2^2 - (a \cdot \tan \beta/2)^2} \right], \quad (18)$$

同样可以发现,在倾斜条件下,油膜微元对应像素接收到的荧光强度变化很小,即其对油膜厚度测量结果几乎不产生影响。

从上述分析可知,模型位姿倾斜的变化仅会引起紫外接收光通量的微小变化,对油膜厚度测量结果几乎不产生影响。模型位姿平移的变化与光源到模型的距离有关,距离的变化会带来成像亮度的变化,进而引起油膜厚度测量误差。

4 实验验证

4.1 实验材料、装置与内容

在模型位姿变化对荧光油膜厚度测量精度影响的验证实验中,光学系统如图 5(a)所示,成像光路

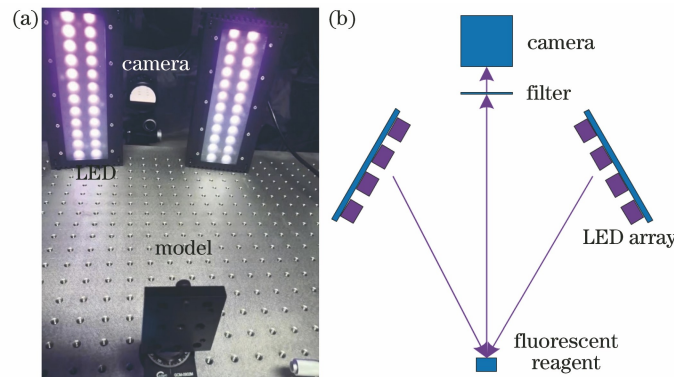


图 5 实验装置及原理。(a)光学系统;(b)成像光路示意图

Fig. 5 Experimental device and principle. (a) Optical system; (b) Schematic diagram of imaging lightpath

4.2 实验结果与分析

模型左右、前后每次移动的距离为 0.1 cm,左右、前后移动的次数均为 10。模型每次的旋转角度为 2° ,转动范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 。分别采集各组图像数据,对每组采集的多幅灰度图像求平均,选取并记录其中最大光强像素点的光照强度值。当模型左右移动时,以记录光强值的最小值为基准计算各个位置的相对误差。当模型前后移动时,利用各个位置的记录光强值来拟合二次反比曲线,并以拟合值为基准计算各个位置的相对误差。当模型旋转时,以记录光强值的最小值为基准计算各个角度的相对误差。荧光强度峰值的相对误差曲线如图 6 所示。另外,当模型旋转时,还对 $-4 \sim 4^\circ$ 转动范围内的记录光强值进行了相对误差计算,计算结果如图 6(b)中的方形点所示。

从图 6 中可以看出,在平行于模型表面的横向

示意图如图 5(b)所示。实验采用的荧光油膜试剂为浑浊黏稠状液体,其激发的荧光波长为 532 nm。紫外 LED 阵列在视觉上呈现为白色,这表明可见光波段的光辐射仍然存在。由于荧光油膜试剂常温下流动性强,实验前需将试剂滴入承载模型的凹槽中并等待凝固,避免在实验过程中移动模型时试剂发生流动,影响测量效果。

实验时,固定相机位置及 LED 光源位置,将荧光油膜试剂凝固的模型多次在平行于模型表面的方向左右移动、在垂直于模型表面的方向前后移动以及根据对称中心的位置倾斜旋转移动,并对采集到的多幅油膜荧光图像进行分析。荧光油膜试剂分布不均匀会导致荧光成像强度分布不均匀,此时利用整个荧光图像强度进行分析势必会带来更大的误差,故选取荧光强度最大的点作为目标进行分析。

方向上,模型小范围平移产生的相对误差小于 1%,故可以认为,在横向方向上的小范围内,对称的 LED 阵列辐照强度均匀性良好。在垂直于模型表面的横向方向上,实际荧光强度峰值与拟合值的相对误差小于 1.5%,故可以初步认为,荧光强度与直线照明距离的二次方近似成反比。以对称中心为基准,当模型倾斜角度范围为 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 时,相对误差较大,能够达到 4%。然而,当倾斜角度范围为 $-4^\circ \sim 4^\circ$ 时,相对误差小于 1%,故可以认为,模型倾斜旋转角度过大会引起显著的误差,小角度倾斜对油膜厚度测量结果几乎不产生影响。

为了进一步验证从图 6(a)中得到的荧光强度与直线照明距离的二次方成反比的结论,在模型前后移动时,将初始直线照明距离 l_1 由 35 cm 增加至 270 cm,每次前后移动距离由 0.1 cm 增加至 2.54 cm。采取同样的方法记录最大光强像素点的

光照强度值,利用记录光强值和(13)式进行理论光强值的计算,此时的实验曲线和理论曲线分别如图7中的 condition1 和 condition2 所示。保证上述

测量条件不变,降低相机曝光度,再次记录荧光强度峰值并计算理论值,该情况下的实验曲线和理论曲线分别如图7中的 condition3 和 condition4 所示。

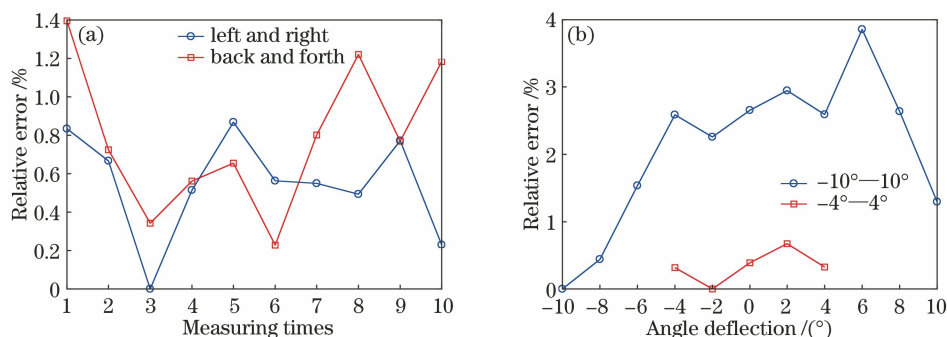


图 6 不同误差情形下,荧光强度峰值的相对误差曲线。(a)模型平移;(b)模型旋转

Fig. 6 Relative error curve of peak fluorescence intensity under different error conditions.

(a) Model translation; (b) model rotation

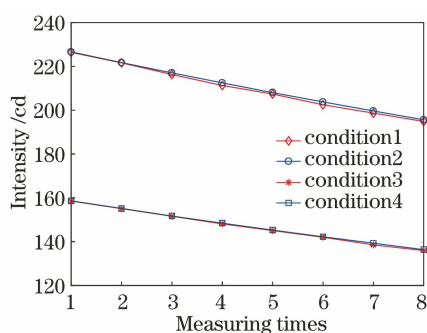


图 7 当模型前后移动时,荧光强度峰值的测量值与理论值的关系

Fig. 7 Relationship between measured values and theoretical values of peak fluorescence intensity when model moves back and forth

从图7中可以看出,实际测量得到的荧光强度峰值和(13)式计算得到的理论值之间的差异较小,其相对误差小于1%。因此,在实际风洞测试中,可根据荧光强度与照明距离的二次方成反比的关系对模型位姿变化引起的油膜测厚误差进行修正。

5 结 论

对模型位姿变化对紫外诱导荧光油膜厚度测量精度的影响进行了理论和实验分析。结果表明,模型位姿的小范围倾斜变化对油膜厚度测量结果几乎不产生影响。但是,模型位姿平移变化引起的模型到光源的距离变化会造成成像亮度的变化,进而引起油膜厚度测量误差。因此,在测量之前要先标定模型到光源的距离与成像亮度的关系。另外,在实际的光照设计中,应根据实际测量条件选择合适的

LED 阵列参数和位置,以保证在测量过程中模型能够始终处于 LED 阵列辐照均匀性良好的区域中。随着测量精度需求的提高,还需考虑模型位姿倾斜条件下紫外光透射率的变化、风洞外部光线对紫外光辐照强度的干扰、杂散光和噪声等对相机成像的干扰、相机视场因素的影响等。另外,在近照明距离测量情况下,油膜表面存在反射现象。同时,LED 光源包含少量的可见光波段成分,故还需对 LED 光源进行非紫外光滤波处理。

参 考 文 献

- [1] Valeur B. Molecular fluorescence: principles and applications [M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2001: 34-54.
- [2] Yu X H, Liu C, Bai C, et al. Progress in light-sheet fluorescence microscopy and applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 100001.
于湘华, 刘超, 柏晨, 等. 光片荧光显微成像技术及应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 100001.
- [3] Wang S T, Wu X, Zhu W H, et al. Fluorescence detection of polycyclic aromatic hydrocarbons by parallel factor combined with support vector machine [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0530002.
王书涛, 吴兴, 朱文浩, 等. 平行因子结合支持向量机对多环芳烃的荧光检测[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0530002.
- [4] Yang J, Qi H X, Xiao G H, et al. Study of oil spill detection technique based on UV-induced fluorescence [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(5): 92-98.

- 杨俊, 亓洪兴, 肖功海, 等. 基于紫外光诱导荧光的溢油监测方法研究[J]. 光电工程, 2011, 38(5): 92-98.
- [5] Zhu Q S, Hao S G, Luo N N, et al. Detection and quantification of vegetable oil adulteration based on laser-induced fluorescence spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1211002.
朱泉水, 郝仕国, 罗宁宁, 等. 基于激光诱导荧光的植物油掺假检测与量化分析[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1211002.
- [6] Almkvist G, Denbratt I, Josefsson G, et al. Measurements of fuel film thickness in the inlet port of an S. I. engine by laser induced fluorescence[C]//1995 SAE International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exhibition, October 16-19, 1995, Toronto, Ontario. Warrendale: SAE International, 1995: 952483.
- [7] Schulz C, Sick V. Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31(1): 75-121.
- [8] Dong J G, Xiang X J. Fluorescence oil flow test technology of inter-sub-super-wind tunnel[C]//The 9th National Conference on Experimental Fluid Mechanics. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2013: 178-182.
董金刚, 向星居. 亚跨超风洞荧光油流流动显示技术[C]//第九届全国实验流体力学学术会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2013: 178-182.
- [9] Chen L, Zhu T, Xu Y, et al. Applications of fluorescence-oil-flow visualization technique in hypersonic wind tunnel test[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2017, 35(6): 817-822.
陈磊, 朱涛, 徐筠, 等. 荧光油流显示技术在高超声速风洞中的应用[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(6): 817-822.
- [10] Zou Y F, Zhang Z Y, Wang X Y, et al. Velocity measurement of fluorescent oil film path movement on wind tunnel testing model surface [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 92-105.
邹易峰, 张征宇, 王学渊, 等. 风洞试验模型表面的荧光油膜路径运动速度测量[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 92-105.
- [11] Daily J W. Laser induced fluorescence spectroscopy in flames [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(2): 133-199.
- [12] Omar S K, Geyer D, Dreizler A, et al. Investigation of flame structures in turbulent partially premixed counter-flow flames using planar laser-induced fluorescence [J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2004, 4(3/4/5): 241-249. [LinkOut]
- [13] Zhu J J, Wan M G, Wu G, et al. Research progress of laser-induced fluorescence technology in combustion diagnostics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401005.
朱家健, 万明罡, 吴戈, 等. 激光诱导荧光技术燃烧诊断的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401005.
- [14] Lu X L, Deng K Y. The study of film thickness measurement by laser induced fluorescence [J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(1): 92-95.
陆霄露, 邓康耀. 采用激光诱导荧光法测量油膜厚度的研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(1): 92-95.
- [15] Schubring D, Ashwood A C, Shedd T A, et al. Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part I: methods and data [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(10): 815-824.
- [16] Schubring D, Ashwood A C, Shedd T A, et al. Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part I: methods and data [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(10): 815-824.
- [17] Hidrovo C H, Hart D P. Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(4): 467-477.
- [18] Cui Y Q, Kong D M, Zhang X D, et al. A method for estimating thick oil film on sea surface based on fluorescence signal [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(1): 150-155.
崔永强, 孔德明, 张晓丹, 等. 一种基于荧光信号的海面厚油膜评估方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(1): 150-155.
- [19] Hidrovo C H, Brau R R, Hart D P. Excitation nonlinearities in emission reabsorption laser-induced fluorescence techniques [J]. Applied Optics, 2004, 43(4): 894-913.
- [20] Häber T, Gebretsadik M, Bockhorn H, et al. The effect of total reflection in PLIF imaging of annular thin films [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 76: 64-72.
- [21] Guilbault G. Practical fluorescence [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1990.
- [22] Wood D. Optoelectronic semiconductor devices [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1994: 84-88.