# 基于剪切敏感液晶涂层的壁面摩擦 力矢量场全局测量方法



赵吉松\*

南京航空航天大学, 江苏 南京 210016

摘 要:针对壁面摩擦力测量问题,建立了一种基于剪切敏感液晶(SSLC)涂层技术的平板表面摩擦力矢量场全局测量方法。该方法利用SSLC涂层在摩擦力作用下的颜色变化特性(不同方向显示不同颜色)并结合其颜色变化与摩擦力大小之间的校准关系解算摩擦力矢量的方向和大小,能够测量整个待测区域的摩擦力矢量分布。应用所述方法测量了平板表面凸起物绕流的摩擦力矢量场。试验结果表明,该方法不仅能够高分辨率测量出平板表面凸起物绕流的摩擦力矢量场,而且能够研究凸起物的尾迹区随着流动速度增加的发展过程。

关键词:壁面摩擦力,测量,剪切敏感液晶,凸起物,干扰区

#### 中图分类号:O355 文

#### 文献标识码:A

流体与固体壁面之间的摩擦阻力是流体动力学领域的 一个重要参数。在空气动力学领域,许多重要信息可以通 过显示或者测量壁面摩擦阻力信息而获取。流过飞行器表 面的气流产生的摩擦阻力会显著影响飞行器的性能。内部 流动产生的摩擦阻力(如喷气发动机压缩空气产生的摩擦 阻力)同样会对发动机的推阻性能产生重要影响。准确测 量摩擦阻力无论是在理论研究中还是工程实际中都具有重 要意义。然而,壁面摩擦阻力的测量一直是一个难题,一直 没有很好的测量方法和技术。参考文献[1]和参考文献[2] 对壁面摩擦力的主要测量方法进行了综述和评论。传统的 摩擦力测量方法主要采用机械或者电子的方法,如机械式 天平、侵入式探针和传感器等。这些方法属于局部方法,只 能测量单点摩擦力信息,并且会给流动带来干扰,甚至会给 壁面带来破坏。如果能够高分辨率测量出壁面摩擦力的矢 量分布,显然具有重要的科学意义和工程价值。

剪切敏感液晶(Shear-Sensitive Liquid Crystal, SSLC) 涂层技术是一种非接触式壁面摩擦力矢量分布的全局测量 方法。SSLC是一种固醇类液晶,其分子在物面上会形成一 种螺旋轴垂直于壁面的螺旋结构,螺旋轴的长度与可见光

#### DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.02.010

的波长量级相同。这种螺旋结构在视觉上非常活跃,对白 光(光谱连续分布的光,如太阳光、钨灯光等)选择性反射, 而且反射波长与螺旋轴长度成比例关系。在壁面摩擦力的 作用下,螺旋结构会变形,螺旋轴会倾斜,综合效果是对入 射光的反射具有很强的方向性,并且这种变化具有快速可 逆性,随摩擦力变化而变化。如果能将SSLC涂层的颜色随 这些参数变化的规律进行校准,那么便可以应用SSLC涂层 测量壁面摩擦力的矢量场。基于这一思路,SSLC涂层技术 已经成功用于测量一些典型流动的壁面摩擦力矢量场[3~10]。 除SSLC涂层技术,目前国际上提出的全局摩擦力场测量方 法主要还有面应力敏感薄膜技术[11,12]、微柱切应力传感 器[13]、油膜干涉法[14]、荧光油膜法[15,16]、摩擦力诊断技术[17~19] 以及软基质薄膜法<sup>[20]</sup>等。与这些方法相比,SSLC涂层技术 的主要特色之处在于其对摩擦力的反应是彩色的、视觉可 见的,并且具有很高的时间分辨率(1kHz)和空间分辨率 (像素级别)。

目前,根据SSLC涂层的颜色变化特性解算摩擦力矢量 场的方法有两种。一种本文称之为多视角法,其原理是基 于 Reda 等<sup>[21]</sup>的研究发现:在垂直光照射下,从不同方向观

收稿日期:2018-11-12,退修日期:2018-12-28,录用日期:2019-01-15

基金项目: 航空科学基金(2015ZA52007);江苏省自然科学基金(BK20150733)

<sup>\*</sup>通信作者.Tel.:18260412336 E-mail: zhaojisong@nuaa.edu.cn

引用格式: Zhao Jisong. Measurement methods of wall shear stress vector field over planar surface using shear-sensitive liquid crystal coating[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(02):53-59. 赵吉松. 基于剪切敏感液晶涂层的壁面摩擦力矢量场全局测量 方法[J]. 航空科学技术, 2019, 30(02):53-59.

测的 SSLC 涂层颜色的波长(或者色调)可以由 Gauss 曲线 拟合,曲线的对称轴为摩擦力方向,曲线峰值与摩擦力大小 存在对应关系。另一种本文称之为两视角法<sup>[5]</sup>。该方法采 用两个同步相机,借助于特定的试验装置提前校准每个相 机观测的 SSLC 涂层的颜色随摩擦力大小和方向的变化规 律,在测量未知流场时能够根据两个相机采集的待测表面 每个点的颜色信息在校准曲线之间插值解算摩擦力大小和 方向。两视角法的优势是只需要从两个方向观测 SSLC 涂 层颜色,但是其校准过程比较复杂。

在测量精度方面,根据Reda等<sup>[21]</sup>研究,两视角方法的 精度低于多视角方法。因为两视角法只利用了两个方向观 测SSLC涂层颜色,而多视角法利用5个或者更多方向观测 SSLC涂层颜色。尽管多视角法在原理上具有更高的测量 精度,但是Reda等<sup>[3,4]</sup>在其研究中采用单个相机依次拍摄 SSLC涂层不同方向的颜色信息。由于流动本身的非定常 性,单个相机在从不同视角拍摄SSLC涂层的颜色时对应的 流动状态并不完全一致,因而容易引人额外噪声。Zhao 等<sup>[7,8]</sup>将多视角法推广至风洞试验测量,但是由于只采用单 个相机拍摄不同方向的SSLC颜色,为了降低噪声,需要多 次测量取平均值。显然,采用多个相机同步采集SSLC涂层 不同方向的颜色可以解决这一问题<sup>[10]</sup>。此外,采用多台相 机同步采集 SSLC 涂层不同方向的颜色具有测量瞬时摩擦 力场的潜力。

本文基于多台同步相机和多视角方法建立了一种应用 SSLC涂层测量平板表面摩擦力矢量场的方法。应用该方 法测量了平板表面凸起物绕流的摩擦力矢量场,并且研究 了凸起物尾迹区随流动速度增加的发展过程。试验结果展 示了SSLC涂层技术测量壁面摩擦力场的能力。

## 1 试验装置

试验研究在小型开口射流风洞中开展,试验装置如图1 所示。该风洞的出口为亚声速喷管,喷管出口尺寸为宽 4cm,高2.2cm。风洞出口的气流速度通过调整喷管压比 (Nozzle Pressure Ratio, NPR)进行调节。试验平台固定于 喷管出口处,平板表面与喷管下唇口平齐,平板尺寸为 25cm×20cm。为了提高SSLC涂层颜色变化的对比度,在 试验平台中间嵌入一个10cm×10cm的黑色电镀铝块。电 镀铝块的前缘距离试验平板前缘5cm。六面体凸起物(厚 度0.5cm,宽度1.0cm)固定于试验平台,位于电镀铝块的上 游,距离其前缘1.0cm。



Fig. 1 Schematics of experimental setup

试验中采用卤钨小灯泡(20W)提供法向照射光。灯泡 置于距离测量区域正上方120cm处,以减小测量区域的光 线照射方向的差异。该光源具有较好的光线平行度(见参 考文献[8])。采用6台相机(Canon EOS 80D)从不同的周向 角¢同时拍摄SSLC涂层的颜色信息。相机俯视角(相机视 线方向与测量表面之间的夹角)设置为28.5°。使用快门控 制器控制相机同步拍照,测试结果表明相机的最高同步拍 照速度最高可达250Hz。但是,由于照射光源的亮度不够, 本试验中无法采用如此高的拍照速度(否则会曝光不足)。 在本试验中,6台相机均设置为手动模式,其中光圈半径 *F*=11,曝光时间*T*=1/4s,感光度ISO= 3200。

试验采用的剪切敏感液晶为Hallcrest BCN/192。本研 究将液晶溶解于丙酮中,使用空气刷均匀喷涂到待测表面。 丙酮快速蒸发,留下一层红色的SSLC涂层。SSLC涂层厚 度约为10μm(根据质量守恒并考虑喷涂损失估算)。该液 晶的清色温度为49°C±1°C,即当SSLC涂层温度低于该温 度时,SSLC涂层对温度不敏感,当其温度高于该温度时, SSLC涂层变成无色。

## 2 摩擦力测量方法

本研究应用 Reda 等<sup>13</sup>提出的多视角法解算摩擦力矢量 场,不同之处是采用6台相机同时拍摄 SSLC涂层在不同方 向的颜色变化。图2给出摩擦力矢量场测量方法,共分 为4步:



图2 摩擦力矢量场测量方法

Fig.2 Shear stress vector field measurement method

(1)在相机周向角 Ø 和摩擦力方向 Ø<sub>r</sub>一致的情况下,校准 SSLC 涂层的颜色变化与摩擦力大小之间的关系。本试验中,在测量区域的射流中心线投影线上刚好满足 Ø = Ø<sub>r</sub>=0。用于颜色校准的摩擦力大小,通过测量边界层速度和采用修正 Coles-Fernholz 公式<sup>[22,23]</sup>计算得到。该计算公式已经

(2)对于任意的待测流场,采用6台相机同时记录不同 周向角观测的SSLC涂层颜色。

(3)对于测量平面的每个点,采用Gauss曲线拟合hue-φ 数据,拟合曲线的峰值对应的周向角为摩擦力矢量的方 经过大量试验数据的验证。为了便于描述SSLC涂层的颜 色,采用参考文献[24]中的三色模型将相机拍摄的RGB信 息转换为色调(hue)信息。本试验的照射光源和成像设备 与参考文献[10]相同,因此可以直接采用参考文献[10]中的 颜色校准曲线,这里不再重复给出。 向 *o*<sub>r</sub>。

(4)将摩擦力方向对应的hue值与步骤(1)得到的颜色 校准曲线相结合,解算出摩擦力矢量的大小。对于待测表 面的每个点,重复步骤(3)和步骤(4)便可以得到全表面的 摩擦力矢量场。

## 3 试验结果与分析

图3给出平板表面凸起物绕流试验的一张原始照片 (*ϕ*=17.7°)。可见,SSLC涂层通过绿色清晰地显示出凸起 物的尾迹区。

图4给出相机从不同方向采集的SSLC涂层颜色。图4 中只给出了2号、4号和6号相机(相机编号参见图2)采集 的图片,其他位于对称位置的相机采集的图片为镜像图片。 图4中的图片已经被变换成正视图(采用测量区域周围的 正方形4个顶点作为校准点),并且不需要部分已经被裁 剪。进行这种视角变换是因为多视角方法要求用于Gauss 曲线拟合的不同方向观测的SSLC涂层颜色取自相同的物 理点。每张图片对应的测量区域为9cm×9cm。图片对称 轴与射流中心线在测量平面的投影重合。可见,SSLC涂层



图 3 平板表面凸起物绕流试验的原始照片(NPR =1.05, $\phi$ =17.7°) Fig.3 Photograph of shear stress measurement over flat plate with a protuberance (NPR = 1.05, $\phi$ = 17.7°)

在不同方向显示不同的颜色。Reda等<sup>33</sup>研究发现,当视线 方向与摩擦力方向一致时,观测到的SSLC涂层的颜色变化 最大,并且摩擦力越大对应的SSLC涂层的颜色变化越大。 根据这一结论,可以定性分析不同区域的摩擦力信息(每张 图片的观测方向是已知的)。如图4所示的三张图片中,图 4(a)中的SSLC涂层颜色变化较大(深绿色),因而摩擦力的 主要方向与图4(a)对应的观测方向较为接近(相对于其他 两张图片而言);凸起物尾迹区的SSLC涂层颜色变化较大, 因而该区域的摩擦力较大。

为了降低图片噪声,同时保留颜色变化的梯度信息,对 每张图片的色调信息进行中值滤波处理,滤波窗口取 1.4mm×1.4mm。采用本文第2节的方法将不同周向角观测 的SSLC涂层颜色转换为摩擦力矢量场。图5给出在不同 流动条件下(NPR = 1.03~1.08)测量的平板凸起物绕流的摩 擦力矢量场。为了便于显示,图中只在若干个y为常值的 截面上,每隔1.2mm给出一个摩擦力矢量。图中彩色云图 表示摩擦力大小,箭头表示摩擦力方向,箭头长短与摩擦力 大小成正比。与参考文献[5]、参考文献[8]相比,图5所示的 摩擦力场噪声较小,一方面因为多视角法具有较高的精度, 另一方面因为本文采用多台相机同步测量不同方向的 SSLC涂层颜色,避免了由于流动不稳定导致的噪声。

需要说明的是,图5给出的不同速度下的摩擦力场是 由同一份SSLC涂层测量得到的。可见,同一份SSLC涂层 可以用于测量不同来流速度下的摩擦力场。

观察图5可知,测量的摩擦力场基本对称分布,这对于 稳态流动是比较合理的,并且也侧面反映了SSLC涂层技术 的可复现性(左右两侧的测量结果相当于镜像复现)。对比 图5(a)~图5(d)所示的摩擦力矢量场可知,SSLC涂层技术



(a)  $\phi = 17.7^{\circ}$ 

(b) *φ*=55.2°

(c)  $\phi = 83.8^{\circ}$ 

图4 不同方向观测的液晶涂层颜色变化(NPR=1.05)

Fig.4 Liquid crystal coating color changes observed at different circumferential angles (NPR = 1.05)



图5 平板表面凸起物绕流的摩擦力矢量场 Fig. 5 Wall shear stress vector field over flat plate with protuberance

成功捕获了摩擦力场随速度增加的发展过程。对于NPR= 1.03到NPR=1.06,如图5(a)~图5(c)所示,凸起物的扰动 效应使得其尾迹区内的摩擦力大小显著增加(相对于其周 围区域),并且尾迹区的范围以及尾迹区内的摩擦力大小随 着来流速度增加而增加。但是,当NPR进一步增加至1.08 时,凸起物尾迹区内的摩擦力相对于周围区域并没有显著 增大,甚至有所减小,如图5(d)所示。此时,凸起物的主要 影响不再是扰动流场而是阻挡气流并将气流推向两侧。由 此可见,SSLC涂层技术除了能够高分辨率测量壁面摩擦力 矢量场之外,还能够提供流场发展过程的重要信息。

## 4 结论

本文基于多视角 SSLC 涂层技术建立了一种测量平板

表面摩擦力矢量场的方法。该方法使用多台同步相机从不同方向同时观测SSLC涂层的颜色,与使用单台相机相比,测量效率更高,能够避免由于流动不稳定导致的噪声,并且具有测量瞬时摩擦力场的潜力。该方法的原理是采用Gauss曲线拟合不同方向的SSLC涂层颜色,解算摩擦力的方向和大小。应用该方法测量了平板表面凸起物绕流的摩擦力矢量场,研究了凸起物尾迹区随来流速度增加的变化过程。试验结果表明,该方法高分辨率测量出平板凸起物绕流的摩擦力矢量场,并且捕获了凸起物尾迹区随流动速度增加的发展过程:当NPR从1.03增加至1.06时,凸起物的扰动作用使其尾迹区的摩擦力增加;当NPR进一步增加至1.08时,凸起物的主要影响是阻挡气流,其尾迹区的摩擦力相对周围区域有所减小。在未来研究中,可提高照射光

源的亮度,将所述方法推广至测量瞬时摩擦力场。

<sup>4</sup>AST

#### 参考文献

- Naughton J W, Sheplak M. Modern developments in shearstress measurement [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6): 515-570.
- [2] Vinuesa R, örlü R. Measurement of wall shear stress [M].U.S.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
- [3] Reda D C, Wilder M C, Farina D J, et al. New methodology for the measurement of surface shear stress vector distributions [J]. AIAA Journal, 1997, 35(4): 608-614.
- [4] Reda D C, Wilder M C, Mehta R D, et al. Measurement of continuous pressure and shear distributions using coating and imaging techniques [J]. AIAA Journal, 1998, 36(6): 895-899.
- [5] Fujisawa N, Funatani S, Kosaka S. Measurement of shearstress distribution by liquid-crystal coating [J]. Measurement Science and Technology, 2003(14):1655-1661.
- [6] Nakano T, Fujisawa N. Wind tunnel testing of shear-stress measurement by liquid-crystal coating [J]. Journal of Visualization, 2006, 9(2): 135-136.
- Zhao J, Scholtz P, Gu L. Color change characteristics of two shear-sensitive liquid crystal mixtures (BCN/192, BN/R50C) and their application in surface shear stress measurements [J]. Science Bulletin, 2011, 56(27): 2897-2905.
- [8] Zhao J, Scholtz P, Gu L. Measurement of surface shear stress vector distribution using shear-sensitive liquid crystal coatings
   [J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(5): 1261-1270.
- [9] 陈星, 毕志献, 宫建, 等. 基于剪敏液晶涂层的光学摩阻测量 技术研究 [J]. 实验流体力学, 2012, 26(6): 70-74.
  Chen Xing, Bi Zhixian, Gong Jian, et al. Optical skin friction measurement using shear-sensitive liquid-crystal coatings [J].
  Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(6): 70-74. (in Chinese)
- [10] Zhao J. Measurement of wall shear stress in high speed air flow using shear-sensitive liquid crystal coating [J]. Sensors, 2018, 18(5): 1605.
- [11] Crafton J, Fonov S, Jones E, et al. Optical measurements of pressure and shear in a plasma [C]// 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Toronto, Ontario Canada,

2005.

- [12] Fonov S, Jones G, Crafton J, et al. The development of optical techniques for the measurement of pressure and skin friction [J]. Measurement Science & Technology, 2006, 16 (6): 1-8.
- [13] Große S, Schröder W. Mean wall-shear stress measurements using the micro-pillar shear-stress sensor MPS3 [J]. Measurement Science & Technology, 2007, 19(1): 015403.
- [14] Vinuesa R, Bartrons E, Chiu D, et al. New insight into flow development and two dimensionality of turbulent channel flows [J]. Experiments in Fluids, 2014, 55(6): 1759.
- [15] Liu T, Montefort J, Woodiga S, et al. Global luminescent oilfilm skin-friction meter [J]. AIAA Journal, 2008, 46(2): 476-485.
- [16] Liu T, Woodiga S, Ma T. Skin friction topology in a region enclosed by penetrable boundary [J]. Experiments in Fluids, 2011, 51(6): 1549-1562.
- [17] Woodiga S, Liu T. Feasibility of global skin friction diagnostics using temperature sensitive paint [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(11): 115402.
- [18] Liu T, Woodiga S, Gregory J, et al. Global skin-friction diagnostics based on surface mass-transfer visualizations [J].
   AIAA Journal, 2014, 52(11): 2369-2383.
- [19] Liu T, Misaka T, Asai K, et al. Feasibility of skin-friction diagnostics based on surface pressure gradient field [J]. Measurement Science & Technology, 2017, 27(12): 125304.
- [20] Bashirzadeh Y, Qian S, Maruthamuthu V. Non-intrusive measurement of wall shear stress in flow channels [J]. Sensors & Actuators a Physical, 2018, 271:118-123.
- [21] Reda D C, Wilder M C, Farina D J, et al. Areal measurements of surface shear stress vector distributions using liquid crystal coatings [C]// 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, 1996.
- [22] Nagib H M, Chauhan K A, Monkewitz P A. Approach to an asymptotic state for zero pressure gradient turbulent boundary layers [J]. Philosophical Transactions a Mathematical Physical Engineeging Sciences, 2007, 365 (1852): 755-770.
- [23] Sanmiguel Vila C, Vinuesa R, Discetti S, et al. The identification of well-behaved turbulent boundary layers [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 822:109-138.

[24] Hay J L, Hollingsworth D K. A comparison of trichromic systems for use in the calibration of polymer-dispersed thermochromic liquid crystals [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 1996, 12(12): 1-12. **作者简介** 赵吉松(1984-) 男,博士。主要研究方向:试验流体力 学、飞行器设计等。 Tel:18260412336 E-mail;zhaojisong@nuaa.edu.cn

## Measurement Methods of Wall Shear Stress Vector Field over Planar Surface Using Shear-Sensitive Liquid Crystal Coating

### Zhao Jisong\*

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

**Abstract:** A method was developed for measurement of wall shear stress vector fields over planar surface using the Shear-Sensitive Liquid Crystal (SSLC) coating technique. The method solves the shear stress vector by using the spatial color change characteristics of the SSLC coating in conjunction with the calibration between SSLC color changes and shear magnitudes, and can measure wall shear stress vector distributions over an entire surface. The method is applied to the measurement of wall shear stresses over a planar surface with a protuberance. Experimental results show that the method can measure the wall shear stress vector field over the planar surface with a protuberance in high resolution, and furthermore, the development of the wake of the protuberance is captured in detail by the method.

Key Words: wall shear stress; measurement; shear-sensitive liquid crystal; protuberance; wake

Received:2018-11-12; Revised: 2018-12-28; Accepted: 2019-01-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2015ZA52007); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20150733)

\*Corresponding author.Tel. :18260412336 E-mail: zhaojisong@nuaa.edu.cn