

叶栅风洞出口处孤立叶片吸力面全域压力分布测量*

项效镨¹, 刘 波¹, 周 强¹, 陈柳生², 郑立新¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院 翼型叶栅空气动力学国防重点实验室,
陕西 西安 710072 2. 中国科学院 化学研究所, 北京 100190)

摘 要: 应用自主建立的压力敏感涂料测量系统对固定在跨声速叶栅风洞出口下挡板处的大弯度孤立叶片吸力面进行了表面全域压力分布测量尝试, 基于涂料实验校准的特性曲线和图像后处理技术, 获得了叶片表面压力分布状况。

关键词: 叶栅; 风洞; 吸力面; 流体力学; 光学测量; 压力测量

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2009) 02-0165-04

Measurement of global pressure distribution on single blade suction surface at the outlet of cascade wind tunnel

XIANG X iao-rong¹, LIU Bo¹, ZHOU Q iang¹, CHEN L iu-sheng², ZHENG L i-xin¹

(1. School of Power and Energy /National Defence Key Lab of Airfoil and Cascade Aerodynamic, Northwest Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China
2. Inst. of Chemistry, Academia Sinica, Beijing 100190, China)

Abstract The global pressure distribution measurements on a single blade suction surface at cascade wind tunnel outlet were conducted in experiments based on pressure-sensitive paint calibration and image processing technology. The results of pressure continuous variation on the suction surface were obtained.

Key words Cascade; Wind tunnel; Suction surface; Fluid mechanics; Optical measurement; Pressure measurement

1 引 言

光学压力测量技术, 即压力敏感测量技术 (Pressure-Sensitive Paint technique, PSP technique) 以其能够反映流场中受测物体表面压力的全域、连续变化且对流场无干扰的优势在国际上得以愈来愈广的应用^[1~6]。

目前基于光强的光学压力敏感涂料测量技术在流场压力测量的应用已经十分成熟, 特别是在内流场和透平机械的研究中表现出不可替代的重要作用, 展现了极其广阔的应用前景^[7,8]。基于涂料发光寿命的测量方法也已经取得明显进展^[9,10], 已开始工程应用, 并发展出了基于相位的测量方法, 标志着光学压

力敏感涂料测量技术逐渐向非定常压力测量的发展趋势。

国内研究虽然经十多年的发展, 但其应用规模仅限于个别研究机构^[11~14], 主要是外流方面的研究与应用, 在内流场方面的研究与应用仍属空白。

依托实验室的现有仪器设备, 应用自主建立的光学压力测量系统和国产荧光压力敏感涂料, 采用基于光强的光学压力测量技术, 在涂料校准实验的基础上, 在国内首次进行了对叶栅风洞出口处孤立叶片吸力面压力分布状况的实验测量尝试, 所采集的荧光灰度图像经相应后处理, 反映了叶栅风洞出口处气流速度在 $Ma = 0.3$ 和 $Ma = 0.4$ 条件下叶片吸力面全域范围内压力连续变化情况, 为今后的研究工作提供了实

* 收稿日期: 2008-02-26 修订日期: 2008-09-03。

基金项目: 国家自然科学基金 (50476071)。

作者简介: 项效镨 (1984—), 男, 博士生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

Email: xiangxiaorong@mail.nwpu.edu.cn

验参考和经验。

2 国产压力敏感涂料与光学压力测量系统

实验测量所采用的压力敏感涂料为国产荧光类涂料^[15~18],外观呈淡蓝色,其中光敏分子为芘类及其衍生物,最佳激发波长 320~340 nm,在 UVA 段的 320~390 nm 范围内均可受激发光,产生波长峰值在 480 nm 左右的蓝色荧光。

自主建立的光学压力测量系统由激发光源及滤光设备、图像采集分系统、校准压力控制分系统、图像处理分系统等组成。其中,激发光源及滤光设备专门针对国产压力敏感涂料而选择,为广谱光固化设备,在 UVA 段可发出 0.5 W/cm^2 的强紫外光,其主峰波长在 365 nm,在 320~340 nm 也有一定的峰值。为避免国产涂料受激所发荧光“淹没”在强可见光中,在光路中安置了两片紫外单通滤光玻璃,用于吸收激发光源所产生的可见光。同时发现激发光源对外照射并不均匀,由内向外照射强度逐渐减弱。

图像采集分系统借用了 PV 测量系统的科学级 CCD 相机,分辨率为 1600×1200 拍摄速度为 15 帧/秒。校准压力控制分系统主要由校准压力密室、正压气源和真空泵、压力表、真空表及相关附件组成,在 10~400 kPa 范围内可进行国产涂料校准。图像后处理分系统主要由法国 ONERA 的 Afix2 压力敏感涂料专用处理软件和 MATLAB 语言及其图形工具箱组成。目前所建立的光学压力测量系统可对风洞和透平机械流场中静止物体表面压力分布状况进行测量。

3 国产涂料校准

涂料校准以当地大气压为基准值 (Reference image pressure),根据实验测量要求,选择了 10 20 30 40 50 60 70 80 90 98.5 108.5 118.5 128.5 138.5 148.5 和 158.5 kPa 等 16 个压力值作为校准测量点。由于校准密室在进行正压与负压转换时需要更换接头,因此保证校准密室与激发光源和 CCD 相机的相对位置变得至关重要。

按照 Stem-volmer 关系对所采集的图像数据进行了相应的后处理,得到了国产涂料的校准特性(如图 1),发现特性曲线并不满足经典的线性 stem-volmer 关系,而是其二次关系,即为

$$p/p_{\text{ref}} = A(t) + B(t)[I_{\text{ref}}/I] + C(t)[I_{\text{ref}}/I]^2 \quad (1)$$

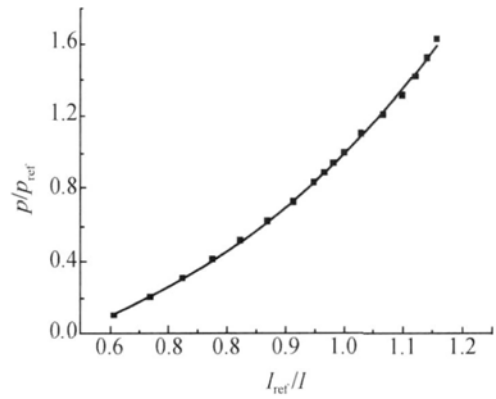


Fig. 1 Characteristic curve for homemade PSP calibration

式中 $A(t)$, $B(t)$ 和 $C(t)$ 为由涂料校准决定的 stem-volmer 常数,此式与传统的 stem-volmer 关系推导式不同,是为了便于对光强图像进行压力数值转换的。

4 实验装置与实验测量的设计

此次实验测量在跨声速叶栅风洞上进行。跨声速叶栅风洞总压高于当地大气压 50 kPa,马赫数在 0.3~0.9 之间,如图 2 所示。与外流风洞相比,叶栅风洞内部空间相对狭小,要进行叶栅表面压力分布测量,需要进行相应的改装。为保证实验测量中具有合适的空间与光路,选择了由较长的上下两块档板和较短的风洞左右端壁组成的叶栅风洞出口作为实验测量地点。

同时,为便于实验测量,选择了带凸台的大弯度独立叶片为实验件,使其沿叶高垂直固定在叶栅风洞下档板内侧,并选择叶片吸力面为实验测量面。为保证叶片与叶栅风洞出口处下档板的刚性固定,在叶栅风洞下档板上加工了 $\phi 10 \text{ mm}$ 的孔和 $\phi 6 \text{ mm}$ 的弧形槽用以固定实验叶片,并可以根据需要调整叶片的攻角。实验叶片吸力面加工有 4 排 10 列 $\phi 1 \text{ mm}$ 小孔,可以用来测量叶背表面压力。实验叶片与跨声速叶栅风洞出口处下档板的固定情况如图 3 所示。



Fig. 2 Transonic cascade wind tunnel at NW PU

5 实验测量与图像后处理

由于孤立叶片处于叶栅风洞出口处,受叶片高度的制约,风洞出口面积相对于正常实验状态要大 50%,且此处气流存在射流现象,因而使得叶栅风洞出口处气流速度大为降低,当内部通道气流马赫数为 0.9 时,出口处气流马赫数仅为 0.4 极大地限制了实验测量的速度范围。为此,只能选取出口处马赫数 0.3 和 0.4 两个状态进行实验测量。

在实验测量中,选取当地大气压为基准,在叶栅风洞启动前或停止工作后,额外采集一组孤立叶片吸力面的荧光灰度图像,作为参考图像,并记录当地大气压值和叶片攻角数值。

实验中发现,由于实验叶片凸台与叶片之间属于槽缝联接,当叶片承受较大气动力时,叶片会围绕某一点发生微小旋转,直线位移在 1 mm 以内。同时由于激发光源照射的不均匀性,加之实验叶片的弯度较大,造成叶片背部紫外光照射不均匀程度加剧。而为了保证测量的精度,始终保持激发光源和 CCD 相机与实验叶片之间的位置不变是实验成功的关键。在分别获取了叶栅风洞出口气流速度在马赫数 0.3 和

0.4 条件下的叶片吸力面荧光灰度实验图像及现场校准荧光灰度参考图像后,应用专用图像处理软件 A fix2 进行了实验和参考荧光灰度图像的对准,确保和实现参考图像中每个像素点与实验图像的相应像素一一对应。若不进行图像对准而直接进入下一工作步骤,会造成图像失真,从而直接影响到测量的准确性和精度。图 4 展示了马赫数 0.3 条件下参考图像与实验图像间的对准过程,图中数字为便于图像对准而设定的位置编号。图 5 显示了马赫数 0.4 条件下经图像对准和未经图像对准的压力图谱对比图。两者之间的差别在于未经对准的图像在叶片前缘和尾缘存在明显的不真实区,且各测压孔存在重影现象。

经对准的荧光灰度参考图像除以实验图像,得到荧光灰度的中间图像,应用式 (1) 即可将灰度之比的图像转换为压力分布图谱 (如图 6、7)。灰度-压力间的转换应用了 MATLAB 语言及其图像处理工具箱中的相应功能。

可以发现,该叶片吸力面的压力分布状况类似于大弯度机翼,前缘受到气流冲压,表现出正压,而在叶背大弯度处气流加速,呈现出负压,符合孤立叶片压力分布规律。在实验测量的同时,还应用了传统的压

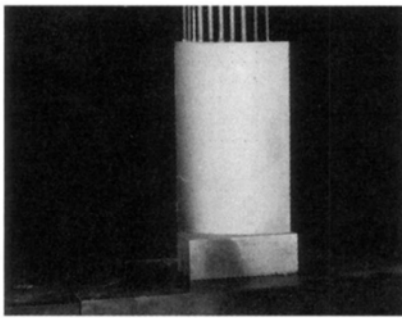


Fig. 3 Single blade fixed on the lower baffle of cascade wind tunnel

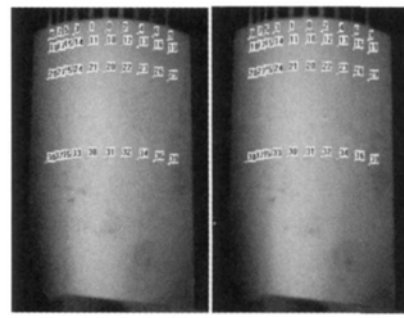


Fig. 4 Schematic of image registration of experiment (right) with reference (left) at Mach 0.3

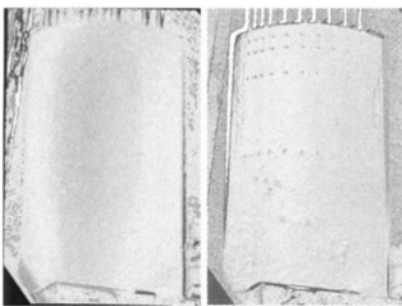


Fig. 5 Comparison of registered false-color image (left) with non-registered one (right) at Mach 0.4

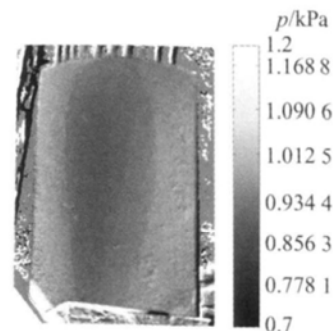


Fig. 6 Pressure distribution false color image of single blade suction surface at Mach 0.3 and attack 0°

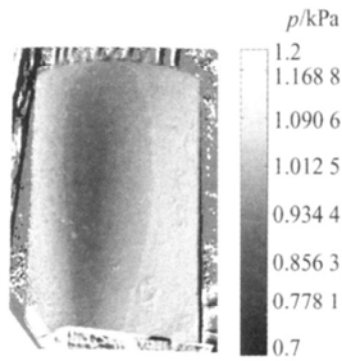


Fig. 7 Pressure distribution false color image of single blade suction surface at Mach 0.4 and attack 0°

力测量方式对叶片吸力面的 10 列测压孔进行了检测, 主要用来检验和校正压力敏感涂料所反映的压力数值。经过对叶片表面最靠近叶顶部的测压孔应用静态压力扫描装置进行同步测量, 并以此作为对比分析的依据, 发现应用光学压力敏感涂料测量技术所获得的测量结果的最大误差在 6.5% 以内, 接近工程应用允许的水平。具体对比情况因篇幅原因拟另文发表。

6 结 论

利用自主建立的光学压力测量系统, 尝试进行了跨音速叶栅风洞出口处的孤立单叶片吸力面压力分布状态的实验测量, 运用法国 Afix2 专用软件实施了荧光灰度的图像对准, 分别获得了孤立单叶片在跨音速叶栅风洞出口处气流速度在马赫数 0.3 和 0.4 攻角 0° 条件下吸力面的压力分布图谱。测量结果较为理想, 同时也验证了测量方法和处理方法的可行性与有效性。该测量尝试为今后进一步广泛开展内流场光学压力测量技术的应用研究奠定了基础, 提供了有价值的参考依据。

参考文献:

[1] Mark E Kammerer, Christopher A Kelble, John F Donovan, et al. Recent improvements in pressure-sensitive paint measurement accuracy at boeing [R]. *AAA* 2002-2907.

[2] Timothy J Bencic. Calibration of detection angle for full field pressure-sensitive paint measurements [R]. *AAA* 2001-0307.

[3] Fletcher Kimura, Gamal Khalil, Nobuyuki Zettsu, et al. Dual lum inophore polystyrene microspheres for pressure-

sensitive lum inescent imaging [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17: 1254~ 1260

- [4] Fonov Sergey D, Goss Larry P, Jones Grant E, et al. New method for surface pressure measurements [R]. *AAA* 2005-1029.
- [5] Tianshu Liu, Guille M, Sullivan J P. Accuracy of pressure sensitive paint [R]. *AAA* 1999-3785.
- [6] Liu T, Sullivan J P. Pressure and temperature sensitive paints [M]. *Springer, New York*, 2005.
- [7] Timothy J Bencic. Development of advanced optical instrumentation for use in the NASA glenn icing research tunnel [R]. *AAA* 2001-0396.
- [8] Shane G Cahagan. Pressure-sensitive paint measurements on a rotor disk surface at high speeds [D]. *Monterey, California: Naval Postgraduate School*, 1997.
- [9] Woodmansee M A, Dutton J C. Treating temperature sensitivity effects of pressure-sensitive paint measurements [J]. *Experiments in Fluids*, 1998, 24(3): 163~ 174.
- [10] Peter D Baumann. Investigation of pressure and temperature sensitive of a pressure sensitive paint [D]. *Monterey, California: Naval Postgraduate School*, 1998.
- [11] 张永存, 邢汉奇, 赵文涛, 等. 光学压力测量技术的应用研究 [A]. 第六届全国实验流体力学学术会议论文集 [C]. 太原: 中国力学学会和中国空气动力学学会, 2004, 388~ 391.
- [12] 肖亚克. 光学压敏涂料测压校准系统及 LabVIEW 的应用 [J]. *传感器技术*, 2002, 21(6).
- [13] 刘波, 周强, 靳军, 等. 压力敏感涂料技术及其应用 [J]. *航空动力学报*, 2006, 21(2).
- [14] 刘波, 周强, 郑立新, 等. 压力敏感涂料测量系统及涂料校准实验 [J]. *空军工程大学学报 (自然科学版)*, 2007, 8(6).
- [15] 金熹高, 林勇, 史燧, 等. 一类芘衍生物及其制备方法与应用 [P]. 中国发明专利, 200610112965.5.
- [16] 肖亚克, 马洪志, 张孝棣, 等. 光学压力敏感涂料的研制 [J]. *传感器技术*, 2003, 22(4).
- [17] 蒋峰芝, 许认, 王夺元, 等. 气动力压敏漆发光特性研究 [J]. *感光科学与光化学*, 1999, 17(4).
- [18] 蒋峰芝, 许认, 王夺元, 等. 气动力压敏漆发光猝灭影响因素的研究 [J]. *功能材料*, 2000, 31(1).

(编辑: 郭振伶)