

压力敏感涂料测量系统及涂料校准实验

刘波¹, 周强¹, 郑立新¹, 陈柳生², 赵旭民¹

(1. 西北工业大学 翼型、叶栅空气动力学国防科技重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 中国科学院 化学所, 北京 100080)

摘要:压力敏感涂料测量技术以其测压范围广、对流动干扰小等优点应用广泛。以叶轮机械内部流场测量为目的,以国产涂料为对象,在国内首次自主构建了压力敏感涂料测量系统,并对涂料进行了校准实验尝试,检验了测量系统的性能,基本摸清了涂料压敏特性和使用寿命,为进一步开展研究奠定了基础。

关键词:压力敏感涂料;校准实验;测量系统;叶轮机械

中图分类号: TQ421.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)06-0072-04

近年来,一种全新概念的压力测量手段——光学压力敏感涂料(Pressure-Sensitive Paint, PSP)技术以其表面全域无插入压力测量、对流动干扰小等显著特点得以广泛应用,显现出不可替代的重要作用^[1-4]。组建一套适合的压力敏感涂料测量系统是开展该技术在叶轮机械流场研究与进行相关实验测量的基础,涂料的校准实验是实验测量与荧光图像数值化的前提^[5-8]。为了实现应用压力敏感涂料技术对叶轮机械内流场进行测量,基于实验室现有技术手段与设备,在国内首次构建了一套适合内流场的压力敏感涂料测量系统,如图1所示。在此基础上,对国产荧光涂料进行了校准尝试,同时也检验和验证了测量系统,并在校准实验的方法、步骤与注意事项方面积累了大量有益的经验。通过数据处理,对涂料的光强与压强特性有了进一步的理解与认识,所得特性曲线与其他文献结论相吻合,说明所构建的测量系统和涂料校准实验是有效的。同时也发现荧光涂料容易退化,存在着使用有效期。

1 压力敏感涂料测量系统

1.1 激发光源分系统

该分系统主要由强紫外光源和滤光暗箱组成。强紫外光源为美国 Uvitron 公司生产的 Porta-ray 400 型便携式紫外光源,其所发光在 UVA 段照射强度可达到 $500\text{mW}/\text{cm}^2$ 。发光元件为由寿命为 1 000 h 的 400 W 的 UV00000320 金属卤化灯泡(光谱如图 2)。选择其作为激发光源有 2 个原因:①光源在 320 nm-340 nm 范围有一定的辐射强度,而国产荧光涂料在该范围内的激发效率最好;②光源在 UVA 段照射强度大。紫外光源有二档功率设置档,即全功率和半功率状态,光源打开 30 min 后辐射强度变化小于 5%。

由于强紫外光源所发光线频谱较宽,涂料样件经照射所发荧光容易淹没在可见光之中,所以需要加装滤光片以保证涂料样件所发荧光强度可被图像捕获分系统捕捉到。为此设计并定制了滤光暗箱,通过使之与紫外光源连成一体,将光源所发光线限制在狭小的暗箱之中,以尽可能相对增加涂料荧光强度。在暗箱中,设置了光线挡板和三道滤光片插槽,可根据需要调整滤光片的数量,还专门设计了放置石英毛玻璃的插槽,以增强紫外光照射的均匀性。同时设计了暗箱的通风管路,将引入通风冷却空气,以降低暗箱内部温度。

收稿日期:2007-04-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50476071)

作者简介:刘波(1960-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事叶轮机械气动设计、流场数值模拟与实验研究。

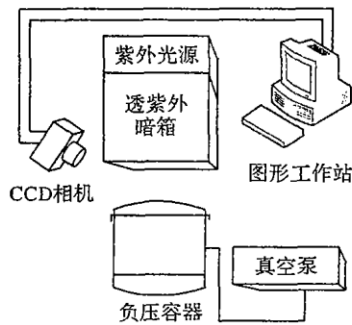


图1 国产荧光压力敏感涂料校准实验示意图

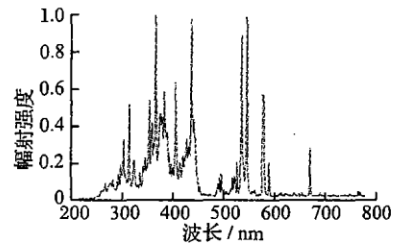


图2 紫外光源的光谱图

1.2 图像捕获分系统

采用PIV的图像采集设备。科学级数字相机采用TSI公司的2台630051型PowerView 2M自相关/互相关摄像机作为测量系统图像采集设备,尺寸为45 mm×68 mm×66 mm,分辨率为1 600×1 200,帧频率为30帧/s,最小跨帧时间在200 ns-400 ns之间,输出10位灰度图象。图像像素尺寸为7.4 μm×7.4 μm,相机控制方式3种可选:Free Run/Triggered Exposure/Triggered Double Exposure。图像输出格式为TIFF格式。该数字相机由计算机通过TSI 610034型同步器控制,并通过TSI 640050型三维坐标立体校准机构调整数字相机和光源及暗箱与负压容器的位置。

1.3 校准压力调节控制系统

该分系统由负压容器、直流真空泵、直流电源、压力控制开关和高精度多功能压力表等组成。由人工根据高精度多功能压力表指示缓慢调节控制开关开度,以控制负压容器内部压强。由于负压容器容积较大,调压过程必须平稳,并应在达到预期压力值后保持10 s左右,以消除负压容器容积惯性带来的压力值误差。直流真空泵能保证负压容器的最低压力值达到6 kPa。目前负压容器还不能进行正压条件下的校准实验。

1.4 图像后处理分系统

该分系统主要由图像处理软件构成,目前有两套系统,即采用MATLAB语言及其图像处理工具箱为处理平台的MATLAB系统和法国ONERA专业PSP图像软件AFIX2系统。2套处理软件各有优缺点,可用来相互对照和互补。

2 系统验证与涂料校准

测量系统的验证通过对涂料样件校准来进行。主要进行了2个阶段的实验:前一阶段以验证测量系统工作性能为主,后一阶段以摸清涂料荧光强度与压力的特性为主。实验布置与现场情况如图3所示。第1阶段实验,选择10 kPa,30 kPa,50 kPa,70 kPa和98.5 kPa为测量点,实验温度10℃;第2阶段实验,在第1阶段测量点的基础上,增加了20 kPa,30 kPa,40 kPa,50 kPa,60 kPa,80 kPa,85 kPa和90 kPa作为测量点。

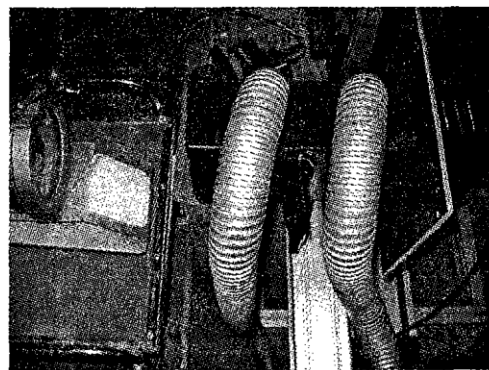


图3 校准实验的布置

实验前,必须接通紫外光源30 min后以保证稳定发光,调整光源与暗箱、数字相机及负压容器3者的位置与距离,以保证光线经暗箱透过负压容器可视窗口垂直照射到涂料样件上,负压容器可视窗口尽可能靠近暗箱,以提高紫外光线照射的强度。还要防止负压容器可视窗口的厚玻璃所反射的光线进入数字相机镜头。相对位置固定后,调节数字相机的光圈与焦距,注意调焦过程中,尽可能调小光圈,以增加图像像素的灰度值,提高图像的信噪比。第1阶段实验采集的涂料样件荧光图像如图4所示。可以发现,随着负压容器压力的不断增加,涂料样件荧光图像逐渐变暗,10 kPa时最亮,98.5 kPa时最暗,呈现出压力敏感涂料的典型光学特性。第2阶段实验增加了各测量点图像采集的数量,并分别进行了光源全功率与半功率状态下的各测量点荧光图像的多次采集。

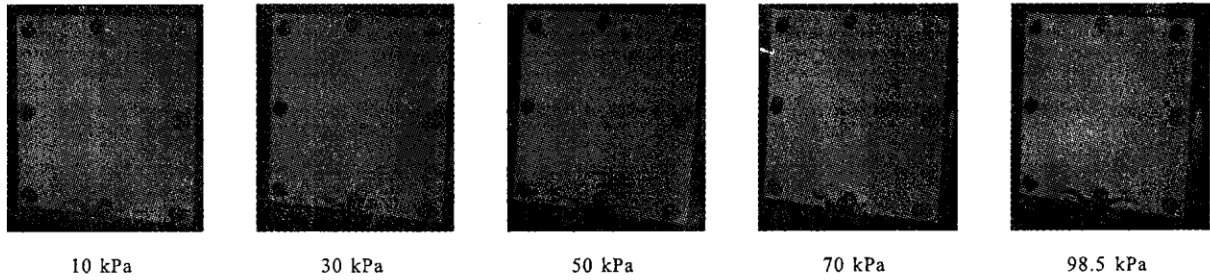


图4 涂料试件荧光图像

3 图像处理与特性分析

根据 Stern - Volmer 公式

$$I_{\text{REF}}/I = A + BP/P_{\text{REF}} \quad (1)$$

式中: I 和 I_{REF} 分别为实际状态和参考状态下试件的发光强度, P 与 P_{REF} 分别为实际状态和参考状态下气体压力。

第1阶段的数据处理以法国 ONERA 的 AFIX2 图像处理软件为主, 以 MATLAB 语言及其图像处理工具箱为辅助。在计算时注意到图像背景的影响, 采用减法运算以提高图像质量。如图5所示, 各测量点试件荧光图像呈现出较好的线性特征, 线性回归后的数值与测量值误差小于5%, 且特性曲线的斜率较大, 与文献[3]、[4]、[9-14]的结论吻合。

第2阶段数据处理, 同时应用了2套处理系统, 以 MATLAB 语言进行全荧光图像灰度求平均, 以 AFIX2 软件在中心点100像素区域内求局部均值。2种软件的处理结果基本一致。但与第1阶段结果相比, 发现回归后的直线斜率趋于平缓, 且其垂直截距也远小于第1阶段如图6所示。借鉴相关文献与资料, 发现随着存放日历时间的增加, 涂料中光敏分子功能退化程度加剧, 引起涂料特性曲线变缓, 而此时涂料样件存放时间已经超过1年。综合以上情况, 可以认为第2阶段的校准实验是真实有效的, 而引起涂料校准特性曲线斜率不够理想的原因在于涂料样件存放时间过长, 涂料中的光敏分子性能退化所致, 即涂料已经超过其有效使用期。

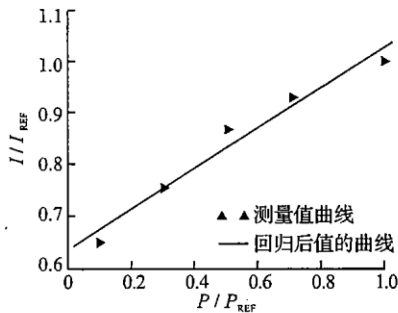


图5 第1阶段实验的校准特性曲线

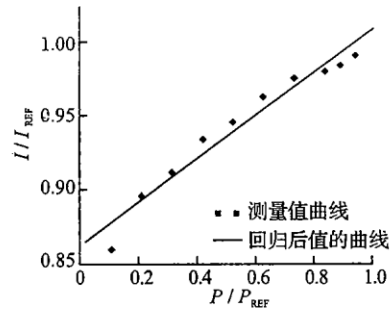


图6 第2阶段实验的校准特性曲线

4 结论

为开展叶轮机械内流场压力测量, 在国内首次自主构建了压力敏感涂料测量系统, 并进行了涂料样件的校准尝试。涂料样件在各测量点的图像数据经处理与线性回归后, 与实际测量值相对误差小于5%, 说明所建测量系统可保证相当的测量精度。第1阶段校准实验的特性曲线斜率基本与相关文献吻合, 说明所构建的测量系统是有效的, 且第1阶段校准实验结果可作为实验中所采集的荧光图像转变为压力分布图像的依据。第2阶段校准实验中出现涂料特性曲线变平缓, 是随着涂料样件存放时间的延长, 涂料中光敏分子功能退化所致, 只要控制好实验的时机与涂料存放的时限, 即可解决该类问题。

参考文献:

- [1] 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):225-233.
- [2] Navarra K R. Development of the Pressure Sensitive Paint (PSP) Technique for Advanced Turbomachinery Applications[R]. Wright - Patterson Air Force Base; Engine Integration and Assessment Branch, 1997.
- [3] Baumann P D. Investigation of Pressure and Temperature Sensitive of a Pressure Sensitive Paint [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 1998.
- [4] Cahagan S G. Pressure - Sensitive Paint Measurements on a Rotor Disk Surface at High Speeds [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 1997.
- [5] 肖亚克,马洪志,张孝棟,等.光学压力敏感涂料的研制[J].传感器技术.2003,(4):29-32.
- [6] 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):50-53.
- [7] 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):309-314.
- [8] 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):72-76.
- [9] Fonov S D, Goss L P, Jones G E, et al. New Method for Surface Pressure Measurements [A]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit [C]. Reno; Nevada, 2005.
- [10] Kammeyer M E, Kelble C A, Donovan J F, et al. Recent Improvements in Pressure - Sensitive Paint Measurement Accuracy at Boeing [A]. 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference [C]. St. Louis, Missouri, 2002.
- [11] Bencic T J. Calibration of Detection Angle for Full Field Pressure - Sensitive Paint Measurements [A]. 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit [C]. Reno; Nevada, NV, 2001.
- [12] Bencic T J. Development of Advanced Optical Instrumentation for Use in the NASA Glenn Icing Research Tunnel [A]. 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit [C]. Reno; Nevada, 2001.
- [13] Liu T S, Guille M, Sullivan J P. Accuracy of - Pressure Sensitive Paint [A]. 30th AIAA Fluid Dynamics Conference [C]. Norfolk; Virginia, 1999.
- [14] Woodmansee M A, Dutton J C. Treating temperature - sensitivity effects of pressure - sensitive paint measurements [J]. Experiments in Fluids, 1998, 24(3): 163 - 174.

(编辑:田新华,徐楠楠)

Construction of Pressure - sensitive Paint Measurement System and Calibration for Homemade Fluorescent Pressure - sensitive Paint

LIU Bo¹, ZHOU Qiang¹, ZHENG Li - xin¹, CHEN Liu - Sheng², ZHAO Xu - min¹

(1. National Defense Science and Technology Keystone Lab of Aerodynamics for Aerofoil and Cascade, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Institute of Chinese Academy of Science, Beijing, 10080 China)

Abstract: Pressure - sensitive Paint Measurement (PSP) Technique has been employed in more and more fields for its unique advantages such as large pressure measurement surface, less interference to fluid field and so on. A PSP Measurement System for turbo - machinery has been established on the basis of equipment in existence for the first time in our nation. Calibration for homemade fluorescent PSP has been conducted in an attempt both to validate the PSP Measurement System and to have as more knowledge of homemade PSP as possible, such as its characteristic of fluorescent intensity versus pressure and its period of validity for use. All of the work prepared the ground for the farther research.

Key words: pressure - sensitive paint; calibration experiment; measurement system; turbo - machinery