

# 快响应 PSP 应用于旋转叶片测试的挑战与对策

彭迪<sup>1,2</sup> 李永增<sup>1,2</sup> 焦灵睿<sup>1,2</sup> 刘应征<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 上海交通大学燃气轮机研究院, 上海 200240)

**摘要** 压力敏感涂料 (PSP) 是一种非接触式光学测量方法, 用于表面压力场的测量, 其具有空间分辨率高、成本低、对流场干扰小等独特优势。近年来发展起来的快响应 PSP, 其响应频率能达到 kHz 级或更高, 使得对于旋转叶片表面瞬态压力的测量成为可能, 但同时也存在诸多挑战。其中直升机旋翼测试中主要的问题是大型风洞测试中的光路布置, 桨叶运动导致的图像不匹配与模糊以及气动加热导致的温度误差; 而在压气机转子测试中, 一方面图像模糊和温度误差问题更加严重, 同时还存在着高温导致的 PSP 失效与光学窗口受限的困难。本文以上述两个应用为例, 深入探讨所面临的挑战与相应的解决方法。

**关键词** PSP; 寿命法; 直升机旋翼; 压气机转子

**中图分类号:** V211.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2020)06-1350-09

## Challenges and Countermeasures of Fast PSP Applications for Measurements on Rotating Blades

PENG Di<sup>1,2</sup> LI Yong-Zeng<sup>1,2</sup> JIAO Ling-Rui<sup>1,2</sup> LIU Ying-Zheng<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Education Ministry for Power Machinery and Engineering, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 800, Dongchuan Road, Shanghai 200240, China;

2. Gas Turbine Research Institute, Shanghai Jiao Tong University 800 Dongchuan Road, Shanghai 200240, China)

**Abstract** Pressure-sensitive paint (PSP) is a non-contact optical measurement technology for surface pressure. It has advantages such as high spatial resolution, low cost and non-intrusiveness to the flow field. Fast-responding PSP is developed in recent years, whose response frequency can reach kHz level or higher, which makes it possible to measure the transient pressure on the surface of rotating blades, but there are also many challenges. The main issues encountered in helicopter rotor test include optical path layout in large wind tunnel test, image mismatch and blur caused by blade movement and temperature-induced errors caused by aerodynamic heating. In compressor rotor measurements, the problems of image blur and temperature-induced errors are more serious. Meanwhile, PSP failure caused by high temperature and the difficulty of limited optical window also exist. Taking the above two applications as examples, this paper provides a detailed discussion about the challenges and corresponding countermeasures.

**Key words** PSP; lifetime based method; helicopter rotor; compressor rotor

## 0 引 言

基于压力敏感涂料 (PSP) 的流场测试技术利用探针分子在受辐射过程当中的氧猝灭现象, 通过建立发光强度或衰减寿命与表面压力的对应关系, 结合先进数字图像采集技术, 实现表面全场压力参数测量。PSP 技术具有空间分辨率高, 流场干扰小, 全域测量以及低成本等优势, 自 20 世纪 80 年代以来, 在风洞试验、飞行器设计等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。近年来, PSP 的响应速度得到了显著提高, 对

动态压力信号的响应频率达到 kHz 级<sup>[2]</sup>; 同时基于 PSP 发光寿命的测试技术得到了进一步发展, 为解决旋转叶片表面压力测量的难题提供了一种有效的方法<sup>[3,4]</sup>, 目前已在包括直升机旋翼与压气机转子测试中得到初步应用。美国 NASA 和德国 DLR 先后在大型旋翼测试中成功应用 PSP 技术, 获得了旋翼桨叶表面的压力分布; 美国普渡大学和日本东北大学的研究小组先后尝试将 PSP 技术应用于涡轮增压器

收稿日期: 2019-03-09; 修订日期: 2020-05-17

基金项目: 国家自然科学基金 (No.11502144, No.11872038)

作者简介: 彭迪 (1986-), 男, 副教授, 博士, 主要从事先进光学气动测试技术研究, idgnep8651@sjtu.edu.cn.

压气机叶片测试。我国在 PSP 技术方面起步较晚, 前期在动力机械领域的应用大多集中在叶栅风洞测试<sup>[9,10]</sup>与气膜冷却研究<sup>[11,12]</sup>, 在旋转叶片测试方面的应用研究亟待开展。作者所在课题组近期开发了频率响应超过 10 kHz 的快响应 PSP<sup>[13]</sup>, 针对旋转叶片测试发展了一系列 PSP 测量方法和技术, 并先后在直升机旋翼和涡轮增压器测试中得到成功应用<sup>[14,15]</sup>。该技术一方面展现出较好的发展前景和潜力, 同时也面临着一系列挑战。以下将对基于快响应 PSP 的寿命法测量技术进行详细阐述, 并结合旋翼桨叶与压气机转子的具体应用探讨所面临的挑战与相应的解决方法。

## 1 基于快响应 PSP 的寿命法测量技术

### 1.1 快响应 PSP 及其测量原理

PSP 的基本原理是基于涂料受激辐射过程中的氧猝灭现象。这一现象导致辐射光强与当地氧气浓度成反比。根据亨利定律, 最终可推导出光强与压力成反比的 Stern-Volmer 方程:

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad (1)$$

其中  $I_{\text{ref}}$  与  $P_{\text{ref}}$  分别为参考条件下的光强与压力。其中系数  $A$  与系数  $B$  受温度影响, 在实际中通常通过标定的方法确定。与氧猝灭效应类似, 在受激辐射过程中, 涂料的荧光特性也受到热猝灭效应的影响, 通过对荧光强度和温度之间的关系进行标定, 实现 TSP 温度测量, 同时这也是 PSP 温度敏感性的来源。

PSP 的响应时间可以用受激辐射衰减的寿命常数来表征, 越短的寿命代表越快的响应。研究表明, PSP 的寿命常数与涂料的厚度平方成正比, 与氧气在涂料中的扩散率成反比。然而单纯通过减小涂料厚度来提高响应速率的方法会导致光强变弱, 图像信噪比降低。因此, 快响应压敏涂料多采用多孔结构提高氧气的扩散率, 进而提高响应速率。本文中采用的 PC-PSP (Polymer Ceramic PSP) 最初由 Scroggin 等开发, 由高浓度陶瓷颗粒与少量粘合剂混合而成, PC-PSP 频率响应可达 5 kHz 以上, 其涂层结构如下图所示。作者所在课题组针对 PC-PSP 涂料的物理性能开展了响应特性预测模型研究, 通过对涂层厚度、粗糙度等参数的优化, 可将 PC-PSP 涂料的响应频率提高到 10 kHz<sup>[13]</sup>。

### 1.2 基于发光寿命的 PSP 测量方法

单脉冲寿命法使用高能量脉冲激光作为 PSP 及 TSP 的激发光源, 如图 2 所示, 在 Gate1 及

Gate2 时间域上利用双曝光 CCD 相机连续采集两张图像。两张图像强度的相对变化反映了该状态下发光寿命的长短。通过与标定数据对比即可得到压力信息。

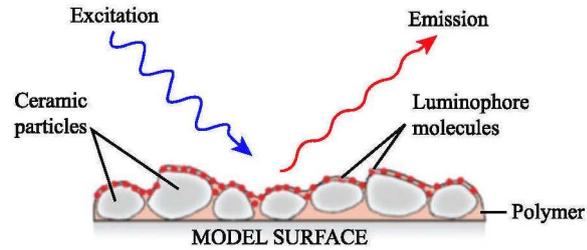


图 1 PC-PSP 示意图  
Fig. 1 Schematic of PC-PSP

由于单脉冲寿命法获取的两张图像来自同一束脉冲激光的激发, 可以消除由于光源的空间分布不均匀引起的误差, 同时, 由于两张图像间隔时间极短, 也能够避免叶片震动或变形带来的误差。由于发光寿命也与涂料的浓度分布相关, 因此还需要对试验结果与参考条件下的结果对比以消除此误差。最终的光强比与压力的关系可通过如下公式描述:

$$\frac{(I_2/I_1)_{\text{ref}}}{(I_2/I_1)} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad (2)$$

其中,  $I_1$ ,  $I_2$  分别为 Gate1 和 Gate2 的光强, 系数  $A$  和  $B$  可通过标定获得。

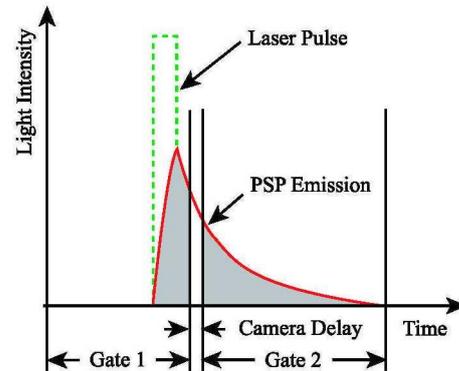


图 2 单脉冲寿命法原理示意图  
Fig. 2 Schematic of Single-shot lifetime method

### 1.3 PSP 涂料的标定方法

PSP 静态标定的实验装置如图 3(a) 所示, 密闭标定箱的压力控制范围为 0~2 倍标准大气压, 温度控制范围为 0~50°C。标定时, 将喷涂有压敏涂料的样片置于标定箱内, 分别利用压力控制器及温度控

制器调节标定箱内部的压力及温度至设定值。利用 532 nm 激光器进行激发并利用高灵敏度 CCD 相机采集图像。标定结果如图 3(b) 所示。根据标定结果计算可得, 压敏涂料的压力敏感度为 0.7 %/kPa, 而压力分辨率主要由所用相机的分辨率决定。目前所用的 14 位 CCD 相机的理论压力分辨率为 8.6 Pa, 考虑到相机噪声等因素, 实际压力测量分辨率在 50 Pa 以内。

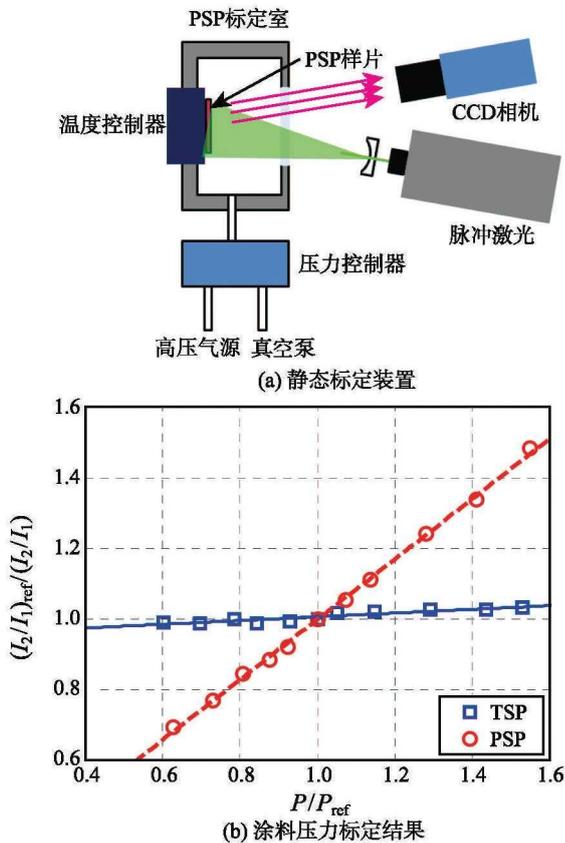


图 3 压敏涂料静态标定实验装置及压力标定结果

Fig. 3 PSP (a) static calibration system and (b) pressure calibration result

## 2 PSP 应用于旋翼桨叶表面压力测量

基于上述 PSP 涂料与测量方法的研究成果, 作者所在课题组与中国空气动力发展中心低速所合作成功在大型低速风洞中使用 PSP 开展了直升机旋翼桨叶表面压力测试。此类旋翼测试中需要解决的主要问题是大型风洞测试中的光路布置、桨叶运动导致的图像模糊与桨叶表面气动加热导致的温度误差。首先, 对于光路布置方面的挑战, 其对策是采用高能量的 532 nm 脉冲激光作为光源, 通过反射镜将激光束从地面传输到桨叶上方合适的位置, 再通过透镜

组进行扩束, 从而覆盖整个测量区域。这样可以使激光在远距离传输过程中能量损失较小, 保证 PSP 测量具有足够的信噪比; 其次, 针对图像模糊的挑战, 发展了基于 PSP 发光寿命的去卷积图像去模糊算法, 能够将模糊图像还原为清晰图像, 基本消除由图像模糊造成的测量误差; 最后, 由于气动加热效应桨叶表面产生径向温度梯度, 需要应用温敏漆 TSP 测量相对桨叶的温度分布, 再基于温度结果对 PSP 测量结果进行修正。

以下将对旋翼桨叶 PSP 测试系统, 数据处理方法以及部分代表性结果展开具体阐述。

### 2.1 试验条件与测试系统

测试系统示意图分别见图 4。本次试验采用的旋翼直径为 2 m, 压敏涂料与温敏漆分别喷涂于相对桨叶的桨尖部分 (喷涂区域为沿径向从桨尖向内 30 cm), 利用带有双曝光模式的相机及同步器锁定某一相位并采集照片, 通过寿命法获得该相位下桨叶表面压力与温度分布, 同时使用温度场对压力结果中的温度误差进行修正。试验工况共 6 组, 具体为悬停状态下 1300 r/min 与 1837 r/min 两个转速, 每个转速下测试 0°、6° 及 10° 三个总距。

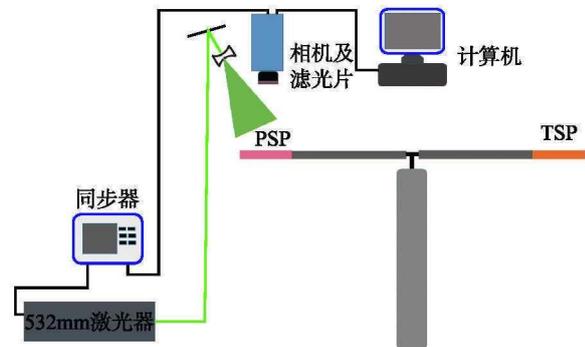


图 4 直升机旋翼 PSP 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of experimental setup for PSP measurement on helicopter rotor

### 2.2 图像与数据处理方法

由于旋翼桨叶在转动过程中存在较明显的振动与变形, 因此每一时刻的桨叶形态均不同, 需要将每一帧捕捉到的桨叶图像精确映射到静止状态下的桨叶图像以获取准确的压力信息。这里采用的方法是在 PSP 涂料表面打上若干标记点, 基于 SURF 标记点自动识别与匹配算法发展了图像校准算法, 实现了高精度的图像自动匹配。

测量系统中的 CCD 相机的内线转移 (interline-transfer) 结构决定其双曝光模式下的后一张图像曝

光时间较长, 考虑到所用荧光材料的寿命约为  $10 \mu\text{s}$ , 后一张图像的有效曝光时间可长达几十微秒, 因此若测量对象 (尤其是桨叶尖端) 处于高速运动的状态下, 将会产生图像模糊的问题, 给压力测量带来误差, 如图 5(a) 所示。这里拟采用一种基于 PSP 荧光寿命的去模糊算法<sup>[16]</sup>, 可有效解决这一问题 (效果如图 5(b) 所示)。该算法在给定荧光寿命和移动速度的基础上, 使用去卷积逆解法, 将模糊图像还原为清晰图像。

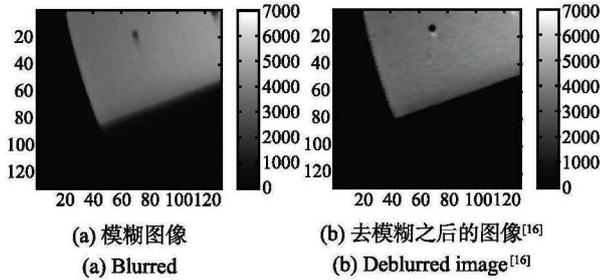


图 5 图像模糊算法应用示例

Fig. 5 Application of image deblurring algorithm: (a) blurred image, (b) deblurred image<sup>[16]</sup>

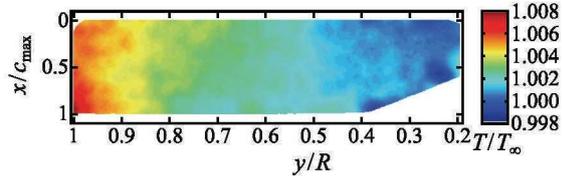
由于快响应压敏涂料的温度敏感性, 测试中旋翼翼桨叶表面的温度变化将引起较显著的压力测量误差, 因此需要进行温度修正。这里采用的方法是在另一片桨叶上喷涂温度敏感漆 TSP, 测得桨叶表面温度场 (如图 6(a) 所示)。由于气动加热效应从中心到桨尖处逐渐增强, 因此该温度场呈现出明显的径向温度梯度, 且该径向温度分布应符合绝热壁面恢复温度公式。为降低温度测量误差, 提高修正精度, 采用二次曲线拟合获得较为平滑的径向温度分布。最终可基于标定获得的压敏涂料的温度响应曲线, 对测量结果进行温度修正。

综上, 试验的数据处理流程如图 7 所示。需首先对双曝光相机采集的第二张图像进行去模糊处理, 其次利用在叶片上标注的标记点进行实验条件及参考条件下图片的匹配, 然后计算出参考条件及实验条件下图片的光强比值, 并根据标定数据计算出温度场和未修正的压力场, 最后利用温度场的结果对压力场进行温度修正, 并计算误差。

### 2.3 试验结果与讨论

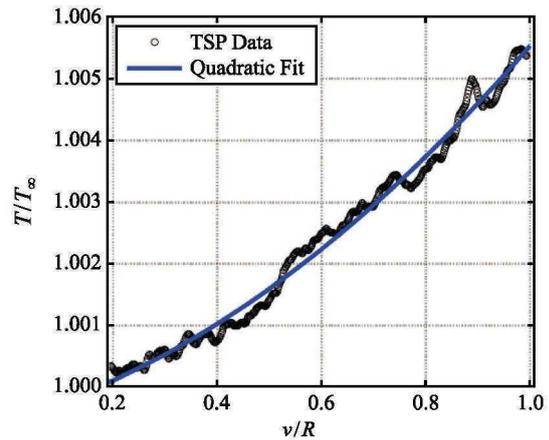
本次实验部分工况下的桨叶表面压力系数分布如图 8 所示。可以明显看出, 经过温度修正后的表面压力分布合理, 在桨尖前缘处呈现明显的低压区; 而后缘附近压力逐渐恢复。前缘压差随转速增加明显增大, 而在同一转速下, 随总距增大而明显

增大。此外, 在  $10^\circ$  总距工况下, 能明显观察到桨尖处受桨尖涡影响的区域以及桨尖涡上翻至桨叶表面的区域。随着总距减小, 桨尖涡强度减弱, 桨尖涡的影响区域逐渐减小, 在  $0^\circ$  总距下影响基本消失。在桨叶  $y/R=0.8$  处, 不同工况下压力系数沿弦长方向的分布见图 9。由于在桨叶前缘及尾缘部分 ( $x/c=0$  与  $x/c=1$  附近), 图像去模糊及配准算法都容易造成误差放大问题, 因此去掉了相应区域的部分结果。



(a) 桨叶表面温度分布

(a) Temperature map on rotor blade



(b) 径向温度曲线拟合结果

(b) Radial temperature distribution obtained by curve-fit

图 6 TSP 测量结果

Fig. 6 TSP measurement result

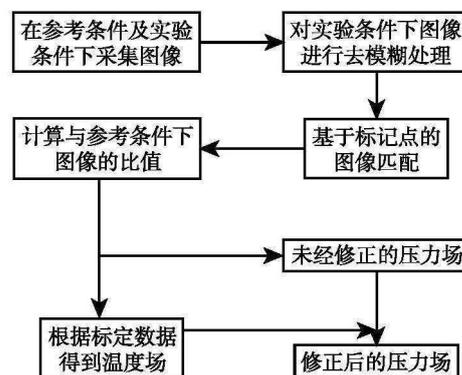


图 7 数据处理流程图

Fig. 7 Flow chart of data processing

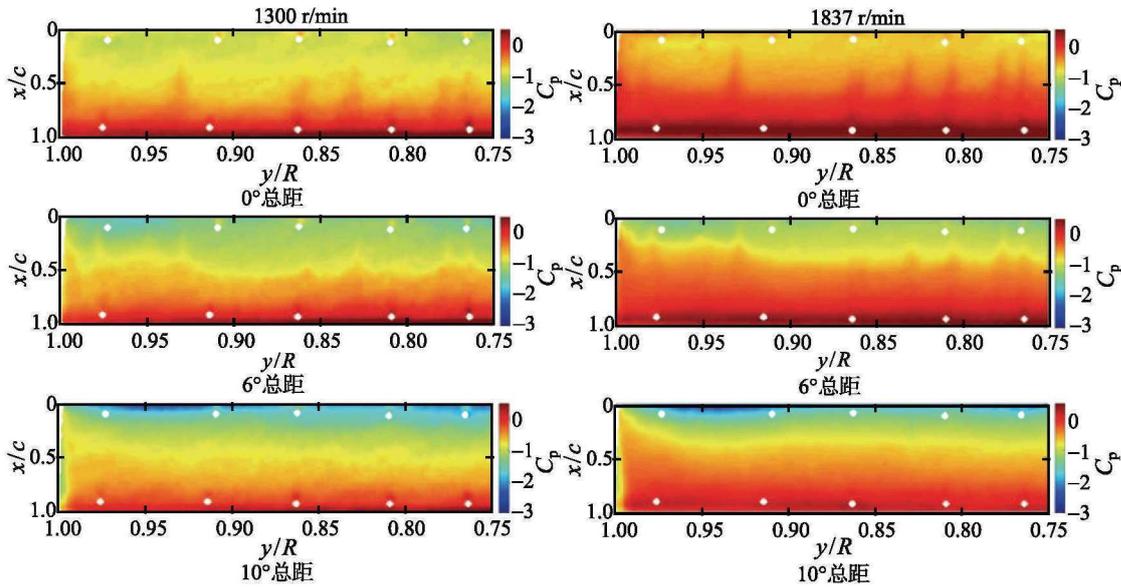


图 8 部分工况下旋翼表面压力分布  
Fig. 8 Pressure distribution on rotor blade under selected test conditions

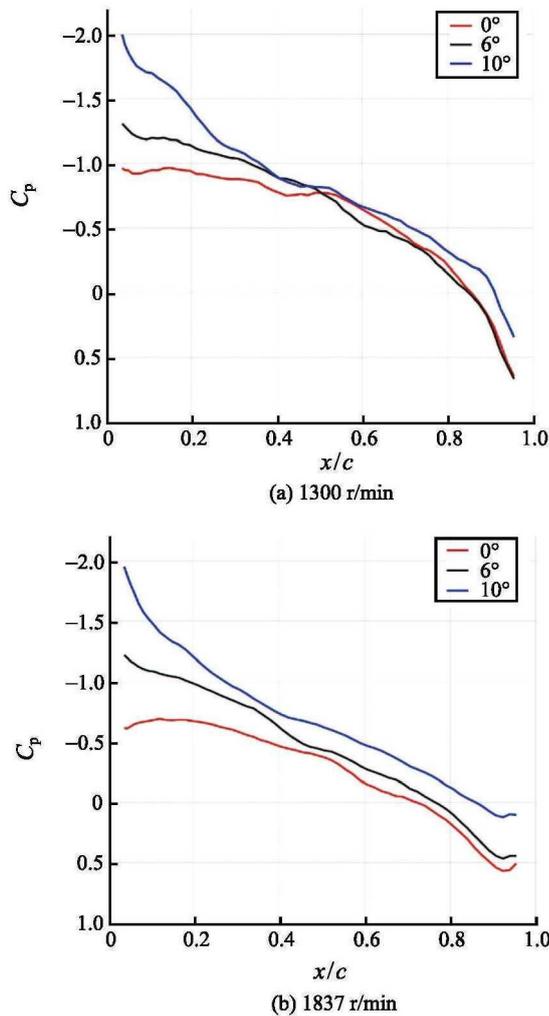


图 9  $y/R=0.8$  处弦向压力系数分布  
Fig. 9 Chordwise pressure coefficient distribution at  $y/R=0.8$

### 3 PSP 应用于压气机转子叶片表面压力测量

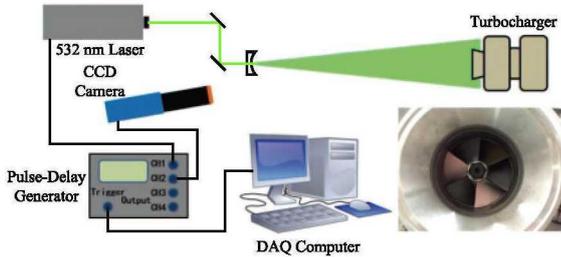
作者所在课题组与日本石川岛公司 (IHI) 合作成功使用 PSP 和 TSP 开展了涡轮增压器压气机转子叶片表面压力与温度测试, 试验中转子最高转速接近 100 kr/min, 相应的叶尖速度达 300 m/s。在此类高速旋转叶片测试中, 一方面图像模糊和温度误差问题更加严重, 同时还存在高温导致的 PSP 失效与光学窗口受限的困难。对于严重的图像模糊问题, 需要在考虑 PSP 发光寿命不均匀分布的前提下, 发展更高精度的图像去模糊算法; 对于叶片表面复杂的温度梯度, 需要在采用 TSP 同步测量温度场的基础上, 发展更高精度的温度修正方法, 即将 TSP 与 PSP 测量结果在像素上一一对应进行温度修正; 对于现有快响应 PSP 在 80° 以上失效的问题, 需要改进涂料配方, 发展能够耐高温的新型 PSP; 对于光学窗口受限的困难, 一种可行的方案是采用内窥镜系统进行光源的传输和 PSP 信号的采集。

以下将对压气机转子 PSP 测试系统, 数据处理方法以及部分代表性结果展开具体阐述。

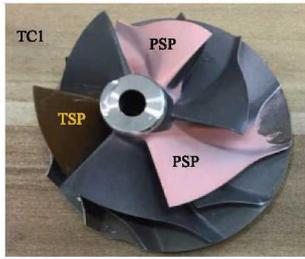
#### 3.1 试验条件与测试系统

本实验在无锡石川岛增压器公司 (WIT) 的涡轮增压器试验台进行, PSP 测试系统与所测试的离心压气机叶轮如图 10 所示。叶轮直径约 8 cm, 共 6 个叶片, 其中两个叶片喷涂有快响应 PSP 涂料用于压力测量, 一个叶片喷涂 TSP 涂料用于温度测量。实

验采用单脉冲寿命法进行测量, 测量系统如图 10 所示。实验所用脉冲激光波长 532 nm, 脉冲能量约 100 mJ。图像通过 CCD 相机的双曝光模式进行采集, 相机 Gate1 图像的曝光时间为 5  $\mu$ s。测试系统时序通过一台延迟脉冲发生器控制。本实验在不同流量和转速工况下进行, 具体测量工况如表 1 中所示。实验中参考温度为 290 K, 参考压力为 101 kPa。



(a) 实验测量系统  
(a) Measurement system



(b) 喷涂PSP/TSP 的压气机转子  
(b) Compressor rotor with PSP and TSP

图 10 实验测量系统和喷涂 PSP/TSP 的压气机转子  
Fig. 10 Schematic of (a) measurement system and (b) compressor rotor with PSP and TSP

表 1 实验工况

Table 1 Test conditions

转速/(kr/min)	流量系数 ( $Q/Q_{ref}$ )
60	1
	1.5
80	1
	0.69
95	1.24
	1
	0.79

### 3.2 图像与数据处理方法

图 11 给出了实验数据的处理流程。由于叶片高速旋转导致的较为严重的图像模糊, 为了方便应用图像去模糊算法, 首先需要将原始图像转换到极坐标下 (如图 12 所示), 然后利用前文所述的去模糊程序对原始图像进行处理, 以消除图像运动模糊引起的误差, 其效果如图 13 所示。之后对处理后的图像逐像素点计算强度比, 再利用标定数据计算压力或

温度值, 从而得到压力、温度分布结果。

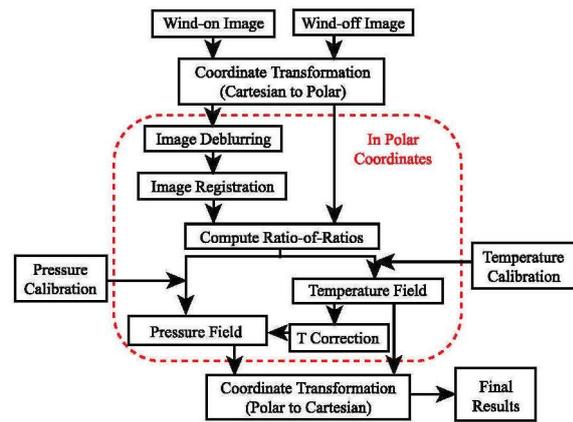


图 11 数据处理流程

Fig. 11 Flow chart of data processing

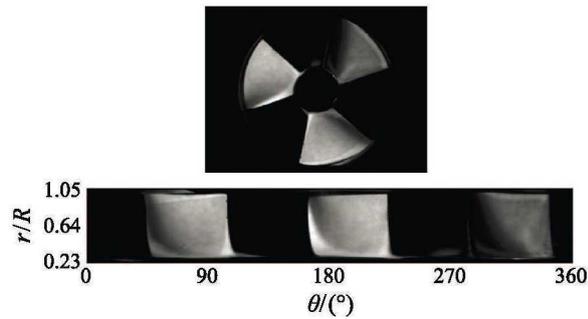


图 12 图像坐标转换

Fig. 12 Coordinate transformation

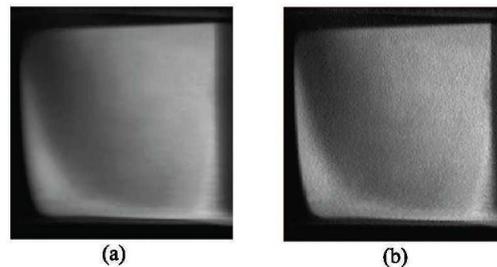


图 13 去模糊前后的 PSP 图像

Fig. 13 PSP images (a) before and (b) after image deblurring

如前文所述, 受 PSP 温度敏感性的影响, PSP 测量数据中存在温度改变引起的误差, 需要根据 TSP 测得的温度场结果对其进行修正。同时, 由 TSP 测量结果可知, 叶片在径向和流向均存在较大温度梯度, 尤其在高转速下温度变化可达数十度, 因此需要基于每个像素点的温度对相应位置的 PSP 数据进行精确的温度修正。图 14 给出了 4 个不同压力下快响应 PSP 的温度标定曲线, 查询 PSP 图像中各点温度, 提取图 14 中对应的四个压力值, 拟合出当

前温度下的压力标定曲线,进而可获得修正后的压力数值。

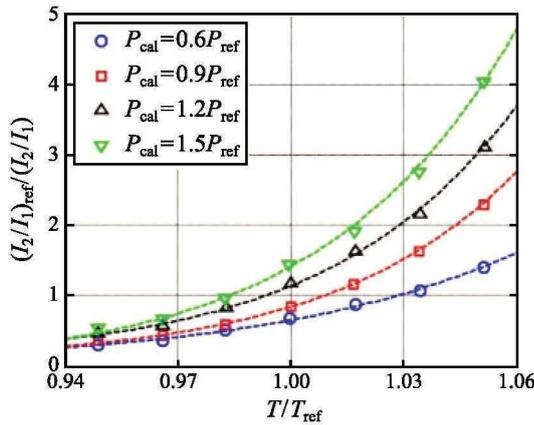


图 14 PSP 不同压力下的温度标定

Fig. 14 Temperature calibration curves at different pressure

### 3.3 试验结果与讨论

叶片表面的温度和压力随转速的变化如图 15 和图 16 所示 (叶轮顺时针转动)。每个转速下,最小的温升出现在叶片前缘位置,最大的温升位于叶片叶尖区域和靠近尾缘的区域。随着转速的增加,整体温升因气动热载荷的增大而显著增大;对压力场而言,沿流向存在较大的逆压梯度,压力从前缘到尾缘逐渐升高,且随着转速的增大,压气机叶片载荷增大,增压能力提高,沿流向的逆压梯度也随之增大。

转动)。不同流量工况下,沿流向和径向的温度梯度均存在,且随着流量的减小,叶片表面的温度明显升高,这是因为从涡轮端通过转轴传导来的热量使压气机叶轮具有一定的温度,随着流量的减小,冷却空气减少,导致压气机叶片与气流间的换热速率减慢,温度有所升高。对压力结果而言,沿流向的存在明显的逆压梯度,在靠近叶片尾缘的位置存在明显的高压区,且集中在中间叶高位置。随着流量系数的减小,压力分布规律变化不大。

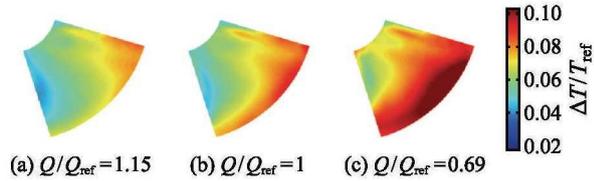


图 17 80 kr/min 转速下叶片表面温度分布

Fig. 17 Temperature distribution on blade surface at 80 kr/min

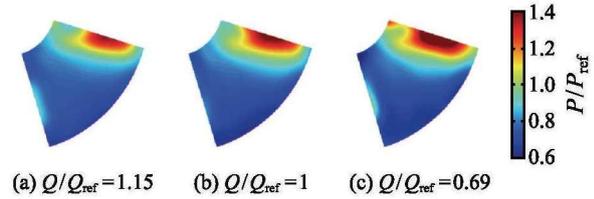


图 18 80 kr/min 转速下叶片表面压力分布

Fig. 18 Pressure distribution on blade surface at 80 kr/min

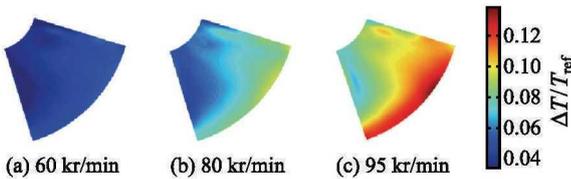


图 15  $Q/Q_{ref}=1.15$  工况叶片表面温度分布

Fig. 15 Temperature distribution on blade surface at  $Q/Q_{ref}=1.15$

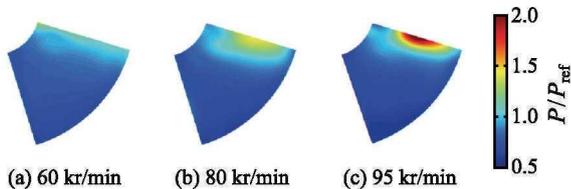


图 16  $Q/Q_{ref}=1.15$  工况叶片表面压力分布

Fig. 16 Pressure distribution on blade surface at  $Q/Q_{ref}=1.15$

图 17 与图 18 为 80 kr/min 转速,不同流量工况下压气机叶片表面温度和压力结果 (叶轮顺时针

如图 19 与图 20 所示,95 kr/min 转速下,叶片温度场分布与 80 kr/min 转速结果相似。压力结果而言,在流量系数  $Q/Q_{ref}=1.25$  和  $Q/Q_{ref}=1$  工况,叶片表面的压力分布较为接近,而在流量系数  $Q/Q_{ref}=0.79$  的工况时,尾缘附近的高压区在压力数值和空间尺度上均明显减小,结合图 20 中的温度结果,可能的原因是该工况下的叶片温度较高 (最高约 350 K),PSP 的压力敏感性降低或涂料“失效”导致的。

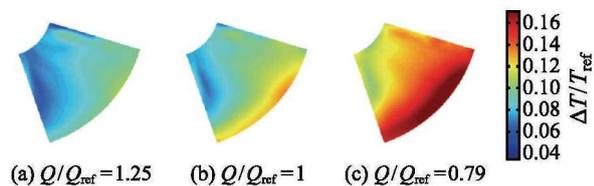


图 19 95 kr/min 转速下叶片表面温度分布

Fig. 19 Temperature distribution on blade surface at 95 kr/min

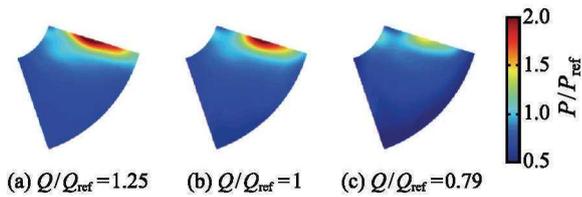


图 20 95 kr/min 转速下叶片表面压力分布

Fig. 20 Pressure distribution on blade surface at 95 kr/min

### 3.4 PSP 高温失效问题

在前期研究中我们发现, 目前 PSP 涂料的温度适用范围有限, 过高温度的处理, 会导致其性能改变。如图 21(a) 所示, 即使经过 60°C 环境的处理, 前述研究中使用的快响应 PSP 寿命的压力敏感特性也已经有了比较明显的降低, 从而造成压力测量结果的误差; 图 22(b) 为快响应 PSP 在 100°C 加热处理前后的压力敏感性曲线, 可以看出经历了高温环境的 PSP 样品压力敏感性发生明显改变, 尤其在正压环境下 PSP 寿命对温度的敏感性降低明显, 到了几乎不可用的

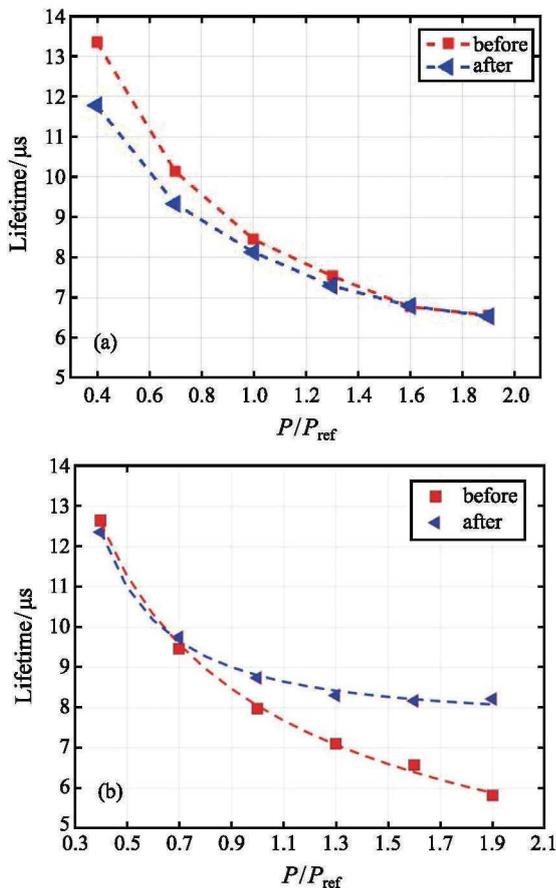


图 21 加热处理前后 PSP 压力敏感性对比: (a) 加热至 60°C 并保持 30 min; (b) 加热至 100°C 并保持 30 min

Fig. 21 Comparison of pressure sensitivity of PSP before/after heat treatment: (a) heated to 60 ° and keep for 30 min; (b) heated to 100 ° and keep for 30 min

程度, 即 PSP 的压敏功能近乎“失效”。然而, 对航空压气机而言, 典型的高压级温度可达 500°C。由此可见, 目前较小的温度适用范围将严重限制 PSP 技术在压气机转子流场测量中的应用。针对这一工程应用中的问题, 作者所在课题组正在开展适用于高温环境的压敏涂料的开发工作。目前已开发出一种基于空心多孔粒子的新型快响应 PSP, 其压力敏感度、光稳定性和抗冲刷能力有了显著提升<sup>[17]</sup>, 且使用温度最高可达 140°C。课题组最近还通过与上海交大材料学院高温涂层课题组合作, 发现一类掺杂稀土元素的磷光材料中存在一种新型的、由氧空位诱发的氧猝灭机制<sup>[18]</sup>, 在此基础上有望开发使用温度高达 600°C 的耐高温 PSP。

## 4 总结与展望

具有 kHz 级响应的快响应压敏涂料与基于 PSP 发光寿命的测量方法已被成功应用于旋转叶片测试。这种先进的测量技术在一定程度上解决了旋翼桨叶和压气机叶片表面压力全场测量的难题。作者所在课题组针对 PSP 测试中遇到的一系列困难和挑战提出了有效的解决方案, 实现了大型旋翼桨叶与高转速压气机叶片的表面压力测量。需要指出的是, 目前 PSP 涂料的使用温度范围有限, 亟需发展能用于 100 ° 以上环境的耐高温 PSP, 以满足动力机械与高超声速等领域的应用需求。另一方面, PSP 测量结果的准确程度也有待进一步评估和验证。考虑到接触式传感器在高速旋转叶片上的应用困难, 需要针对典型工况开展数值模拟工作, 利用 CFD 结果对 PSP 数据进行验证; 在此基础上改进 PSP 数据处理算法, 进一步提升其测量精度。

## 参考文献

- [1] Liu T, Sullivan J P. Pressure and Temperature Sensitive Paints [M]. New York: Springer, 2005
- [2] Gregory J W, Asai K, Kameda M, et al. A Review of Pressure-sensitive Paint for High-speed and Unsteady Aerodynamics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G, 2008, 222(2): 249-290
- [3] Juliano T J, Kumar P, Peng D, et al. Single-shot, Lifetime-based Pressure-sensitive Paint for Rotating Blades [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(8): 085403
- [4] Disotell K J, Peng D, Juliano T J, et al. Single-Shot Temperature- and Pressure-Sensitive Paint Measurements on an Unsteady Helicopter Blade [J]. Experiments in Fluids, 2014, 55(2): No.1671
- [5] Watkins A N, Leighty B D, Lipford W E, et al. Measuring Surface Pressures on Rotor Blades Using Pressure-Sensitive Paint [J]. AIAA Journal, 2016, 56(1): 206-215

- [6] Weiss A, Geisler R, Schwermer T, et al. Single-shot Pressure-sensitive Paint Lifetime Measurements on Fast Rotating Blades Using an Optimized Double Shutter Technique [J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58: No.120
- [7] Gregory J W. Porous Pressure-Sensitive Paint for Measurement of Unsteady Pressures in Turbomachinery [R]. AIAA 2004-0294, 2004
- [8] Pastuhoff M, Tillmark N, Alfredsson P H. Measuring Surface Pressure on Rotating Compressor Blades Using Pressure Sensitive Paint [J]. *Sensors*, 2016, 16(3): No.344
- [9] 郑立新, 郝重阳, 周强, 等. 光学压力敏感涂料测量技术及其在内流场的应用 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25(12): 2704-2710  
Zheng L, Hao C, Zhou Q, et al. Application of Optical Pressure Sensitive Paint Measurement Technique in Internal Flow Fields [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(12): 2704-2710
- [10] 高丽敏, 高杰, 王欢, 等. 大弯角扩压叶栅吸力面全域压力分布的 PSP 实验 [J]. *航空动力学报*, 2011, 26(9): 2061-2067  
Gao L, Gao J, Wang H, et al. PSP Experiment of Global Surface Pressure Distribution on Suction Surface of Compressor Cascade with Large Curved Angle [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(9): 2061-2067
- [11] 张超, 王湛, 周嗣京, 等. 压力敏感涂料的标定及在气膜冷却效率测量中的应用 [J]. *航空动力学报*, 2011, 26(12): 2691-2697  
Zhang C, Wang Z, Zhou S, et al. Calibration of Pressure-sensitive Paint and Application to the Measurement of Film Cooling Effectiveness [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(12): 2691-2697
- [12] Li W, Shi W, Li X, et al. On the Flow Structures and Adiabatic Film Effectiveness for Simple and Compound Angle Hole With Varied Length-to-Diameter Ratio by Large Eddy Simulation and Pressure-Sensitive Paint Techniques [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2017, 139: No.122201
- [13] Jiao L, Peng D, Liu Y. Dynamic Response of Polymer Ceramic Pressure Sensitive Paint: Improved Model Considering Thickness Effect [J]. *AIAA Journal*, 2018, 56(7): 2903-2906
- [14] Peng D, Jiao L, Liu Y. Development of a Grid PSP/TSP System for Unsteady Measurements on Rotating Surfaces [R]. AIAA 2016-0345, 2016
- [15] Peng D, Jiao L, Yu Y, et al. Single-Shot Lifetime-Based PSP and TSP Measurements on Turbocharger Compressor Blades [J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58: No.127
- [16] Gregory J W, Disotell K J, Peng D, et al. Inverse Methods for Deblurring Pressure-Sensitive Paint Images of Rotating Surfaces [J]. *AIAA Journal*, 2014, 52(9): 2045-2061
- [17] Peng D, Gu F, Liu Y. A Novel Sprayable Fast-Responding Pressure-Sensitive Paint Based on Mesoporous Silicone Dioxide Particles [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 279: 390-398
- [18] Yang L, Peng D, Xiao S, Guo F, Liu Y, Zhao X, Xiao P. Oxygen Quenching in Eu-based Thermographic Phosphors: Mechanism and Potential Application in Oxygen/Pressure Sensing [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 254: 578-587