

文章编号: 1000-8055(2023)11-2809-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220011

基于 CCD 相机的转子 PSP 短曝光图像增强采集方法

高丽敏^{1,2}, 葛 宁^{1,2}, 杨冠华^{1,2}, 王 磊^{1,2}, 欧阳波^{1,2}

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 西北工业大学 翼型、叶栅空气动力学国家级重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 针对转子光学压敏测量技术的需求, 提出了基于 CCD(charge-coupled device)相机的转子短曝光图像增强采集方法, 并组建了相应的测量系统, 采用两种方法(短曝光图像增强采集与瞬态图像采集)的 9 个曝光时间对转速为 2 700 r/min 小型风扇转子叶片进行了图像采集。实验结果表明: 该转子短曝光增强采集方法和测量系统可有效提升转子图像质量; 转子短曝光图像增强采集得到的旋转状态图像模糊长度小于 4 像素时, 实现图像“无运动模糊”采集; 采集次数满足静止图像曝光时间与旋转图像曝光时间之比时, 旋转状态图像亮度与静止状态图像相当。

关 键 词: 旋转机械; CCD 相机; 短曝光; 图像增强采集; 采集次数

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Image enhancement acquisition method with short exposure based on CCD camera for rotor PSP

GAO Limin^{1,2}, GE Ning^{1,2}, YANG Guanhua^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, OUYANG Bo^{1,2}

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. The National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In view of the requirements of rotor pressure sensitive paint measurement technology, an image enhancement acquisition method with short exposure for rotor based on a charge-coupled device (CCD) camera was proposed, and a corresponding measurement system was established. Two methods (short-exposure image enhancement acquisition and transient image acquisition) of 9 exposure cases were implemented on the rotor blades of a small-scale fan at 2 700 r/min. The experimental results showed that the rotor enhanced acquisition method with short exposure, and the measurement system, can effectively improve the rotor image quality; “no motion blur” image can be achieved when the blur length of the rotating image obtained by using the image enhancement acquisition method with short exposure of the rotor was less than 4 pixels; the brightness of the rotating state image was equivalent to that of the static image when the number of acquisitions equalled to the ratio of static image exposure time to rotating state image exposure time.

收稿日期: 2022-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(92152301); 国家自然科学基金重大项目(51790512); 引智计划(B17037); 民机专项;
西北工业大学博士论文创新基金(CX202009)

作者简介: 高丽敏(1973—), 女, 教授、博士生导师, 博士, 研究领域为叶轮机械气动热力学。E-mail: gaolm@nwpu.edu.cn

引用格式: 高丽敏, 葛宁, 杨冠华, 等. 基于 CCD 相机的转子 PSP 短曝光图像增强采集方法[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2809-2816. GAO Limin, GE Ning, YANG Guanhua, et al. Image enhancement acquisition method with short exposure based on CCD camera for rotor PSP[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2809-2816.

Keywords: rotating machinery; CCD camera; short exposure; image enhancement acquisition; times of acquisition

旋转机械是应用于国民经济中能源与动力行业的关键设备,其表面压力是气动设计与运行安全的重要气动参数^[1]。但是由于高速旋转产生的离心力严重影响了转子实验安全性与信息传输的可靠性,除低转速探索性试验^[2-3]外,高速旋转机械的实验大多集中于进出口静止区域^[4]、静止机匣表面气动参数的测量^[4-5]。

由于只需在气动表面喷涂微米级的涂层而无需对气动模型“破坏性”安装,普渡大学 Liu 等^[6]于 1997 年用光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)和点激光扫描系统,开展了压气机转子叶片的光学压敏涂料(pressure sensitive paint, PSP)实验,展示了 PSP 测量技术在旋转机械应用的潜力。同年,弗吉尼亚理工学院 Navarra 等^[7]用 ICCD 相机与高功率单脉冲激光束获得了转子叶片的压力分布图像,但激光束稳定性成为实验结果准确度的关键。随后, NASA Lewis 研究中心的 Bencic^[8]发展频闪照明技术提高了转子叶片的光学压敏涂料(PSP)图像质量;普渡大学 Gregory^[9]在 2004 年的涡轮增压器转子 PSP 测量中认为频闪脉宽应与转子叶尖速度相关。类似的频闪照明方法也被应用于低速涡轮转子^[10]、模型化的直升机旋翼^[11]以及旋转圆盘^[12]等。频闪光源有限的脉宽、脉冲稳定性成为光强法 PSP 转子实验的限制。

由于具有试验成本低廉、高空间分辨率等优势,国内于 2000 年后也开展了相应的研究,并在光学压敏涂料的研制^[13]、测量方法^[14-15]拓宽、图像处理^[16]等方面取得了突出成果,并应用于翼型^[17]、跨/超声速叶栅^[18-19]、气膜冷却^[20]等研究; Peng 等^[21]与 Juliano 等^[22]探索了寿命法的转子 PSP 实验以解决光强法的图像模糊,但第二次成像模糊仍不可避免。因此,国内有关于转子 PSP 的实验测量技术一直处于探索阶段。

基于课题组开展转子 PSP 实验探索研究的基础,本文针对转子 PSP 实验中的图像采集问题,提出了基于 CCD 的短曝光图像增强采集方法以解决转子 PSP 实验图像运动模糊与图像信噪比的矛盾,组建了基于 CCD 相机的转子 PSP 实验测量系统,实现了小型风扇转子叶片的高质量图像采集。本文的研究工作是开展高速转子 PSP 实

验的基础性研究工作,可为后续开展航空航天领域核心旋转机械气动表面的压力测量奠定技术基础。

1 短曝光图像增强采集方法

1.1 PSP 测量原理

在合适波长的激发光照射时,光学压敏涂料发生“光致发光”与“氧猝灭”两个光物理过程:光学压敏涂料在激发光照射下会由于能量跃迁而产生辐射光,但在“氧猝灭”效应下辐射光强减弱;随着空气压力增大猝灭程度增强,相应的辐射光强随之减弱。

空气压力 p 与涂料辐射强度 I 的关系可以用 Stern-Volmer 关系式来定量描述

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = A + B \frac{p}{p_{\text{ref}}} \quad (1)$$

其中 A 、 B 是 Stern-Volmer 系数,由光学压敏涂料的特性决定;下标 ref 表示为参考状态,通常在大气条件获得。

1.2 转子图像采集的问题分析

图 1 为转速为 ω 的转子模型及位于 ϕ_0 相位的被测转子叶片示意图。叶片表面上任意点 M 的坐标为 (X, Y) , X 是叶片弦长方向,叶片向 X 负方向运动。根据式(1),若采用数字图像采集设备对转子叶片上 PSP 涂料的辐射光强进行采集,则应保证数字图像像素点 (x, y) 上的光强 I 是气动模型物理坐标 (X, Y) 处的压力 p 的精确映射。

不失一般性地将转子瞬态旋转运动视作速度为 ωr 的直线运动。若叶片均匀稳定发光,假设其

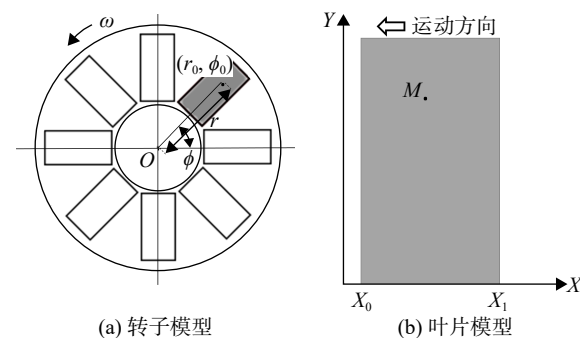


图 1 转子及叶片模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rotor and blade model

单位时间内所发出的光强为 f , 则图像采集设备在曝光时间 t_e 内采集到的图像像素点 (x, y) 处的光强为

$$I(x, y, \phi_0) = \int_0^{t_e} f(X - \omega t, Y, \phi_0) dt \quad (2)$$

显然, 图像 $I(x, y, \phi_0)$ 是转子叶片上物理坐标点 (X, Y, ϕ_0) 至坐标点 $(X - \omega t_e, Y, \phi_0)$ 间所有 X 坐标点上辐射光强的积分值。因此, 图像 $I(x, y, \phi_0)$ 上必然存在着长度为 s 的运动模糊

$$s = [\omega t_e / k] \quad (3)$$

符号 $[\bullet]$ 为取整函数, k 为图像分辨率。

显然, 当图像分辨率 k 和转速一定的情况下, 曝光时间 t_e 不仅与图像的运动模糊长度 s 呈线性正比关系, 而且与图像光强 $I(x, y, \phi_0)$ 亦正相关: 曝光时间 t_e 越短, 模糊长度 s 越小, 则图像边缘越锐利, 展示的纹理和细节越清晰, 当清晰程度与静止状态拍摄的图像接近, 则认为图像“无运动模糊”, 但也同时降低了图像光强 I 导致图像信噪比随之下降。因此, 高速旋转转子的高信噪比、“无运动模糊”瞬态图像采集无疑是开展转子 PSP 实

验的关键与前提。

1.3 转子短曝光图像增强采集方法

目前, CCD 相机曝光时间已达到纳秒级, 远低于高功率频闪光源的频闪脉宽。基于高速旋转机械稳定运行工况的周期性特征, 借鉴文献 [8] 的频闪照明方法, 本文提出了基于 CCD 相机的转子 PSP 实验的短曝光图像增强采集方法。

在转子短曝光图像增强采集方法如图 2 所示。转子 PSP 实验过程中, 激发光源保持连续发光, 并锁定被测叶片为 ϕ_0 相位; 用相位锁定信号触发 CCD 相机在极短曝光时间 t_e 内进行转子叶片“无运动模糊”瞬态图像采集 $I_1(x, y, \phi_0)$; 高速旋转过程中, 相位锁定装置将发出 n 次锁相信号, 则触发 CCD 相机进行 n 次瞬态图像的采集 $I_n(x, y, \phi_0)$; 将所采集到的 N 张 ϕ_0 相位的叶片图像序列 $I_n(x, y, \phi_0) (n = 0, 1, \dots, N-1)$, 其中 n 为旋转圈数) 进行叠加, 即可得到转子叶片位于 ϕ_0 相位的亮度增强且“无运动模糊”瞬态图像 $I(x, y, \phi_0)$ 。

由于光源稳定激发, 因此每个曝光时间内叶片表面的辐射光强 $I_n(x, y, \phi_0)$ 也较为稳定, 这样上述转子短曝光图像增强采集方法可写为

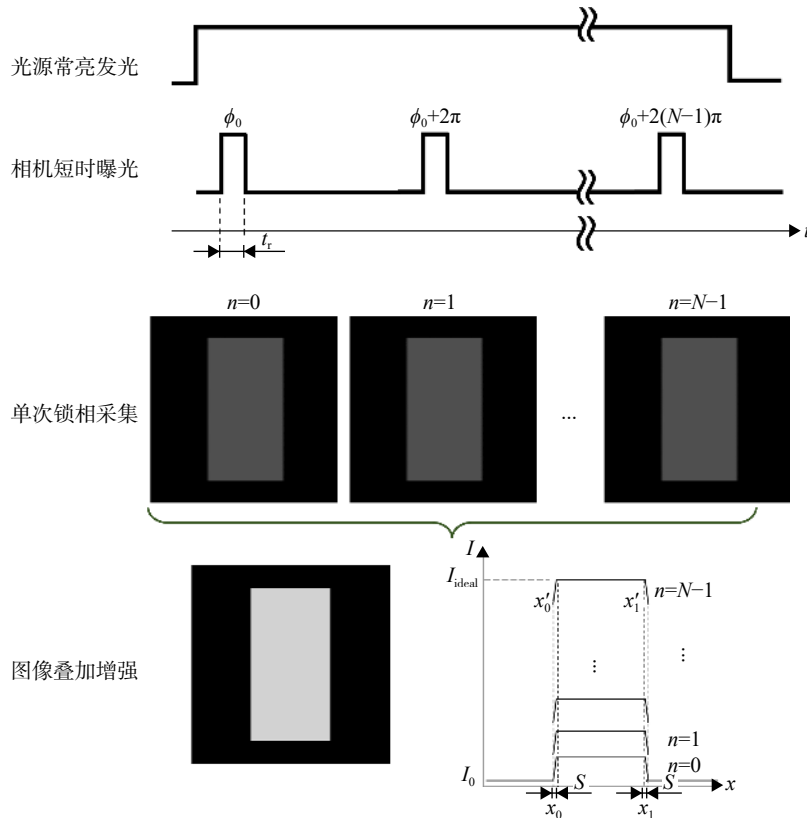


图 2 转子短曝光图像增强采集方法

Fig. 2 Enhancement acquisition method with short exposure for rotor

$$I(x, y, \phi_0) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y, \phi_0 + 2n\pi) \approx NI_n(x, y, \phi_0) \quad (4)$$

在实际实验中,可以设定极短的 CCD 相机曝光时间 t_r 以控制图像序列 $I_n(x, y, \phi_0)$ 运动模糊长度,从而保证像素点 (x, y) 与气动模型 (X, Y) 之间的高精度匹配;另外,通过 CCD 相机的 N 次图像采集与强度叠加,从而大幅增强转子瞬态 PSP 图像的信噪比。多次图像累加中和了单次瞬态图像发光强度不稳定以及相机随机噪声的带来的测量误差,进一步提高了图像的信噪比。

2 转子 PSP 测量系统及实验方案

2.1 转子 PSP 测量系统

根据被测转子的叶尖速度,并调研产品级 CCD 相机的短曝光性能,本文组建了由基于 CCD 相机的图像采集系统、激发光源、激光型相位锁定器、信号发生器组成的转子 PSP 测量系统^[23],系统简图如图 3 所示。

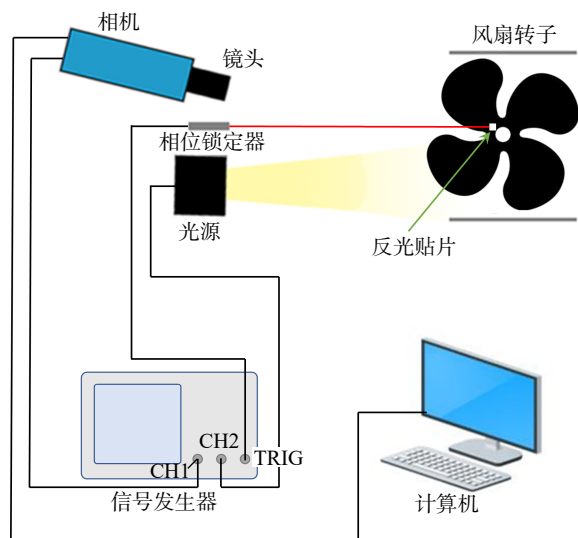


图 3 转子图像增强采集系统

Fig. 3 Rotor image enhancement acquisition system

基于 CCD 相机的图像采集系统由 14 位高灵敏度背板制冷的科学级 CCD 相机搭载 Nikon 50 mm f/1.4D 定焦镜头组成。其中,CCD 相机为灰度值最大为 16 384,图像分辨率为 2 048 像素 $\times$ 2 048 像素,曝光时间为 500 ns $\sim$ 49 d,可达到的最短曝光时间远小于频闪光源的频闪脉宽,满足本文所提出短曝光图像增强采集方法对曝光时间的要求;图像采集系统亦配备与 PSP 光学性能一致的滤光片以滤除光源和环境光。

激发光源为国产高稳定性连续发光 LED 准直阵列光源,该光源在一个小时内的所发出的光功率稳定性不低于 99.7%,具有功率高、成本低、聚光能力强、稳定性好等优点^[8-12];激光型相位锁定器由安装于轮毂 ϕ_0 相位的反光贴片、激光发射器和接收器共同实现对转子叶片在 ϕ_0 相位的锁定;所有仪器连接于信号发生器,产生满足 CCD 相机所需的外触发信号。

图 4 为最大转速为 3 000 r/min 的小尺寸风扇模型。由于 PSP 涂料是对压力敏感的,在旋转和静止拍摄状态下呈现的图像灰度并不相同,不利于图像纹理细节的比对和对图像运动模糊程度的判断。因此,本次研究在被测转子叶片喷涂具有一定颗粒度的银色反光漆以模拟叶片表面 PSP 涂料的弱辐射光,涂层的表面粗糙度相较于 PSP 有一定提升,加强了图像的纹理特征,有利于对图像细节的辨识、与静止图像的比对以及对图像运动模糊程度的判断。实验时其余叶片喷黑处理,并保持黑环境,以尽可能避免光学实验的光污染。实验现场如图 5 所示,图像采集设备正对风扇叶片,尽可能保证相机光轴与叶片面垂直。

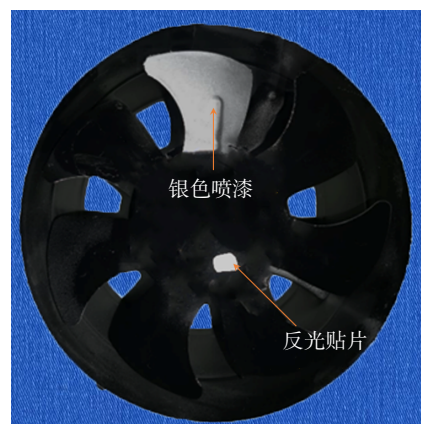


图 4 被测银色喷漆叶片及锁相反光贴片

Fig. 4 Blade with silver paint and reflective patch for phase locking

2.2 实验方案

以无“过曝光”、图像亮度高为原则,确定转速为 0 r/min 的图像采集曝光时间 $t_s = 270 \mu s$,下标 s 代表静止状态。所采集到的静止叶片图像如图 6 所示,由于叶片扭转而导致叶片前缘处的亮度不均,其余区域明显的“颗粒感”类似于压敏涂料的不均匀发光,便于图像模糊程度的定量分析。经过计算,图像分辨率为 $k=0.11$ mm/像素,叶片区域的平均亮度 $B_s = 8 267$ 。图中红线区域用于文

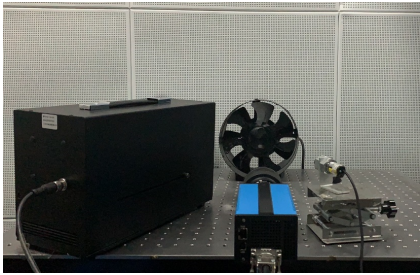


图 5 实验现场
Fig. 5 Experiment scene

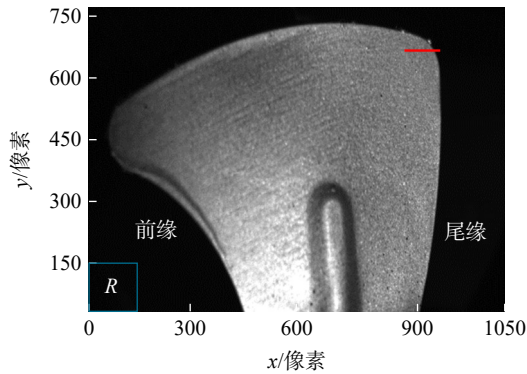


图 6 静止图像
Fig. 6 Static image

中第 3.3 节图像亮度与模糊长度的定量分析。

为了验证转子短曝光图像增强采集方法与测量系统的有效性,本文对 2 700 r/min 的转子分别进行了如表 1 所示的常规瞬态图像采集与短曝光图像增强采集。作为对比,采用与短曝光图像增强采集单次曝光时间 t_r ,对转子图像进行单次曝光采集即常规瞬态图像采集,其中下标 r 代表旋转状态。

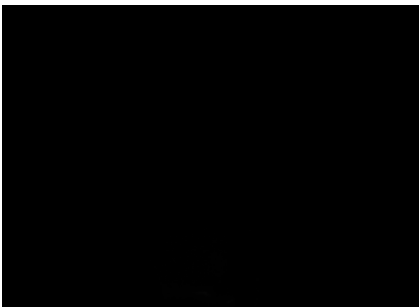
表 1 图像采集方案
Table 1 Cases of image acquisition

序号	$t_r/\mu\text{s}$	N	
		短曝光图像增强采集	常规瞬态图像采集
1	0.5	540	1
2	2	135	1
3	5	54	1
4	10	27	1
5	18	15	1
6	27	10	1
7	45	6	1
8	54	5	1
9	67.5	4	1

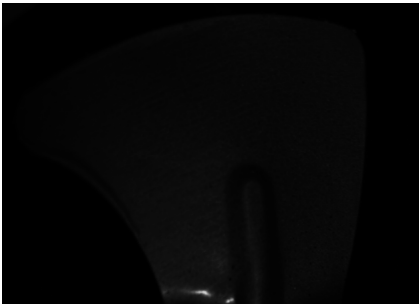
3 结果分析与讨论

3.1 常规瞬态图像采集结果

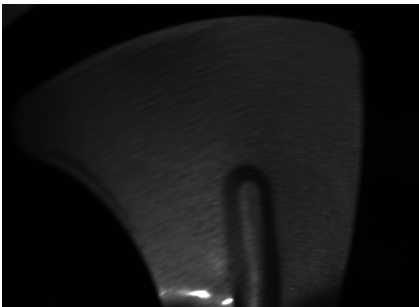
图 7 为采用常规瞬态采集的转子图像。由于曝光时间 $t_r=0.5\ \mu\text{s}$ 极短,这导致进入 CCD 相机的进光量非常有限,图 7(a)的图像基本呈黑色;直到随着曝光时间延长至 $t_r=18\ \mu\text{s}$ 时,图 7(b)上叶片图像才隐约可见;延长曝光时间 $t_r=67.5\ \mu\text{s}$,尽管图 7(c)的图像亮度有所提高,但仍明显低于图 6 的静止图像,同时叶片表面纹理细节和叶片边缘轮廓已由于过长的曝光时间而出现了明显模糊现象。



(a) $t_r=0.5\ \mu\text{s}$



(b) $t_r=18\ \mu\text{s}$



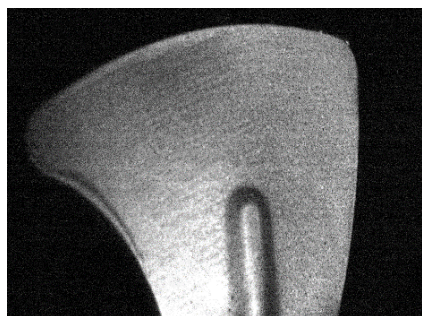
(c) $t_r=67.5\ \mu\text{s}$

图 7 转子叶片瞬态图像采集
Fig. 7 Rotor blade images of transient image acquisition

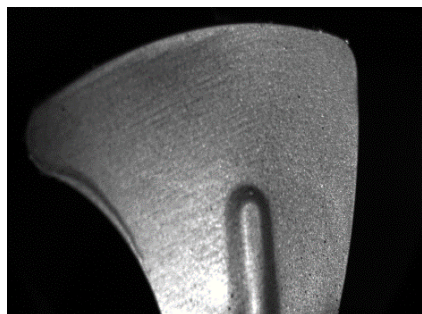
3.2 短曝光图像增强采集的图像分析

由图 8 所示的短曝光图像增强采集到的图像可知,所有采集方案的图像整体亮度图 6 的基本相当,这主要是因为短曝光图像增强采集的 9 种

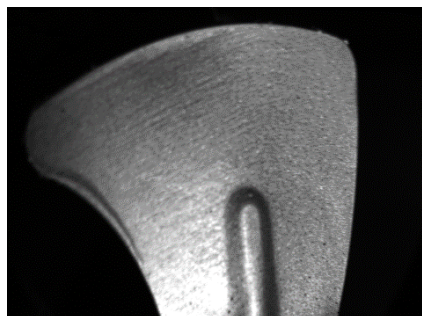
方案均通过采集次数 N 的设定基本保证了 $t_r N = t_s$ 。尽管曝光时间 $t_r = 0.5 \sim 18 \mu\text{s}$ 非常短, 但该曝光时间下的图像(图 8(a)和图 8(b))上的转子叶片非常清晰, 颗粒状的纹理与静止图像基本相同, 无明显的运动模糊特征; 当曝光时间的延长 $t_r = 27 \mu\text{s}$ 时, 图 8(c)的图像亮度并未随着曝光时间的



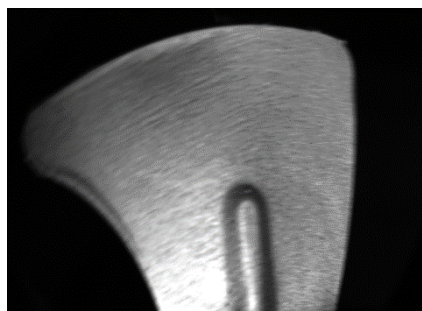
(a) $t_r = 0.5 \mu\text{s}$, $N = 540$



(b) $t_r = 18 \mu\text{s}$, $N = 15$



(c) $t_r = 27 \mu\text{s}$, $N = 10$



(d) $t_r = 67.5 \mu\text{s}$, $N = 4$

图 8 短曝光图像增强采集结果

Fig. 8 Images of enhancement acquisition with short exposure

延长而增强, 但图像上原本颗粒状的纹理由于运动模糊而变为条状纹理; 且随曝光时间的增加而增加, 当 $t_r = 67.5 \mu\text{s}$, 图 8(d)的图像模糊程度进一步加剧, 模糊长度 s 高达 15 像素, 较高的运动模糊导致叶片表面纹理细节已难以分辨。

3.3 图像亮度与模糊长度的定量分析

对短曝光图像增强采集图像图 8 的转子叶尖尾缘(图 6 红线)进行运动模糊长度 s 的提取, 并与式(3)计算的结果进行对比。由图 9 可知, 实验提取的运动模糊长度与式(3)的计算结果几乎完全一致; 当图像分辨率 k 与转速确定时, 图像的运动模糊长度随着图像采集的曝光时间而线性延长; 当曝光时间 $t_r < 18 \mu\text{s}$ 时, 数字图像的模糊长度 $s < 4$ 像素, 即对应于转子叶尖的位移 $S < 0.5 \text{ mm}$, 可以视为“无运动模糊”的转子瞬态图像。因此, 对本实验对象与实验布局, 若限定 CCD 相机的曝光时间 $t_r < 18 \mu\text{s}$ 时可有效控制转子图像的运动模糊, 确保图像像素点对转子叶片的映射不超过 0.5 mm 。

瞬态图像采集与短曝光图像增强采集图像上叶片区域的无量纲平均亮度 B/B_s 如图 10 所示。显然, 瞬态图像的亮度 B/B_s 随曝光时间 t_r 的延长而

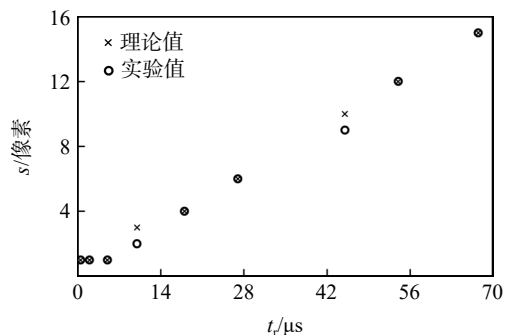


图 9 短曝光图像增强采集的运动模糊长度

Fig. 9 Motion blur length of enhancement acquisition with short exposure

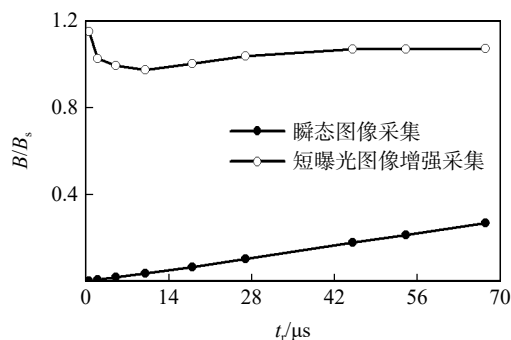


图 10 叶片图像的无量纲亮度

Fig. 10 Dimensionless brightness of blade images

线性增加,但其最大值仍不到静止图像的 $1/3$; 由于短曝光图像增强采集方案设定了 $N = t_s/t_r$, 短曝光图像增强采集图像无量纲亮度 $B/B_s \approx 1.0$, 图像亮度与静止图像基本相当。这表明本文所发展的短曝光图像增强采集通过采集次数 N 补偿了高速转子图像采集由于短曝光引起的进光量不足的问题。

4 结 论

针对转子光学压敏测量技术对图像采集质量的需求,本文提出了适用于转子 PSP 实验的转子短曝光图像增强采集方法,组建了基于 CCD 相机的测量系统,并进行了小尺寸风扇转子叶片的图像采集的实验验证,为下一步开展高速、大尺寸工业领域的旋转机械表面压力的 PSP 实验奠定了技术基础。主要研究结论有:

1) 由转子 PSP 实验的图像采集问题分析可知,图像采集的曝光时间是影响转子 PSP 图像质量的关键;本文提出了基于 CCD 相机的短曝光图像增强采集方法,并揭示了进行转子 PSP 图像的高质量采集的基本原理。

2) 论文组建了转子 PSP 实验的测量系统,对 2 700 r/min 的小尺寸风扇转子进行 9 种曝光时间的瞬态图像采集与短曝光图像增强采集,验证了短曝光图像增强采集方法的有效性。

3) 转速为 2 700 r/min 小尺寸风扇转子的实验结果表明:若短曝光图像增强采集的曝光时间 $t_r < 18 \mu\text{s}$ 时则可得到图像模糊长度 $s < 4$ 像素的“无运动模糊”图像; N 次短曝光图像累加,显著地提升转子瞬态图像亮度;若短曝光图像增强采集次数满足 $N = t_s/t_r$ 时,旋转状态图像亮度与静止图像相当。

参考文献:

- [1] DICKENS T, DAY I. The design of highly loaded axial compressors[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(3): 031007.1-031007.10.
- [2] 王庆伟, 刘波, 侯为民, 等. 压气机转子叶片表面动态压力测量的探索[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(10): 2327-2332. WANG Qingwei, LIU Bo, HOU Weimin, et al. Tentative research about pressure measurement on one point of compressor rotor blade surface[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(10): 2327-2332. (in Chinese)
- [3] 张帅, 张强波, 张霞妹. 基于方差分析的航空发动机风扇叶片外物撞击识别[J]. *航空学报*, 2021, 42(5): 187-198. ZHANG Shuai, ZHANG Qiangbo, ZHANG Xiamei. Identification of foreign object impact on aero-engine fan blades with variance analysis[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(5): 187-198. (in Chinese)
- [4] REID L, MOORE R D. Performance of single-stage axial-flow transonic compressor with rotor and stator aspect ratios of 1.19 and 1.26, respectively, and with design pressure ratio of 1.82[R]. NASA Technical Paper 1338, 1978.
- [5] 向宏辉, 蒋世奇, 高杰, 等. 跨声速压气机转子叶尖间隙流动失稳试验研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2018, 31(3): 5-13. XIANG Honghui, JIANG Shiqi, GAO Jie, et al. Experimental investigation of rotor tip clearance flow instability in transonic axial flow compressor[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2018, 31(3): 5-13. (in Chinese)
- [6] LIU T, TORGERSON S, SULLIVAN J, et al. Rotor blade pressure measurement in a high speed axial compressor using pressure and temperature sensitive paints[R]. AIAA1997-162, 1997.
- [7] NAVARRA K R. Development of the pressure-sensitive-paint technique for advanced turbomachinery applications[D]. Blacksburg, US: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [8] BENCIC T. Rotating pressure and temperature measurements on scale-model fans using luminescent paints[R]. AIAA 1998-3452, 1999.
- [9] GREGORY J. Porous pressure-sensitive paint for measurement of unsteady pressures in turbomachinery[R]. Reston, US: the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.
- [10] AHN J, SCHOEIRI M T, HAN J C, et al. Film cooling effectiveness on the leading edge region of a rotating turbine blade with two rows of film cooling holes using pressure sensitive paint[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128(9): 879-888.
- [11] WONG O, WATKINS A, INGRAM J. Pressure sensitive paint measurements on 15% scale rotor blades in hover[R]. Reston, US: the 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2005.
- [12] KAMEYA T, MATSUDA Y, YAMAGUCHI H, et al. Pressure-sensitive paint measurement on co-rotating disks in a hard disk drive [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(1): 82-86.
- [13] 陈柳生, 周强, 金熹高, 等. 压力敏感涂料及其测量技术[J]. *航空学报*, 2009, 30(12): 2435-2448. CHEN Liusheng, ZHOU Qiang, JIN Xigao, et al. Pressure-sensitive paint and its measuring technique[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(12): 2435-2448. (in Chinese)
- [14] 高丽敏, 王欢, 刘波, 等. 测量系统特性对压敏涂料校准影响的实验研究[J]. *航空学报*, 2010, 31(1): 76-81. GAO Limin, WANG Huan, LIU Bo, et al. Experimental of study influence of measurement system characteristics on pressure-sensitive paint calibration[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(1): 76-81. (in Chinese)
- [15] 祝勇, 董哲, 彭迪, 等. 压力敏感涂料PSP宽域(1~600 kPa)静态标定方法研究[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(3): 69-76. ZHU Yong, DONG Zhe, PENG Di, et al. A study of a wide range (1—600 kPa) static calibration method for pressure sensitive paints [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(3): 69-76. (in Chinese)
- [16] 李国帅, 周强, 马护生, 等. 基于预先校准的压力敏感涂料图像处理方法[J]. *空气动力学学报*, 2014, 32(2): 197-202. LI Guoshuai, ZHOU Qiang, MA Husheng, et al. Image processing methods of pressure sensitive paint based on prior calibration[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2014, 32(2): 197-202. (in Chinese)
- [17] 张永存, 陈柳生, 阎莉, 等. 压敏涂料技术在风洞中的应用研究[J]. *实验流体力学*, 2010, 24(1): 74-78, 94. ZHANG Yongcun, CHEN Liusheng, YAN Li, et al. Investigation

- and application of pressure sensitive paint technique in wind tunnel test[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2010, 24(1): 74-78, 94. (in Chinese)
- [18] 张雪, 袁洪杰, 王猛, 等. 跨声速叶栅叶片快速响应PSP测量研究[J]. *空气动力学学报*, 2019, 37(4): 586-592, 599.
ZHANG Xue, ZHONG Hongjie, WANG Meng, et al. Fast response pressure-sensitive paint measurement of transonic cascades [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2019, 37(4): 586-592, 599. (in Chinese)
- [19] 刘祥, 熊健, 黄辉, 等. 基于0.6 m量级三声速风洞的压敏漆试验技术[J]. *航空学报*, 2020, 41(7): 134-142.
LIU Xiang, XIONG Jian, HUANG Hui, et al. Experimental technique of pressure sensitive paint based on 0.6 m trisonic wind tunnel[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(7): 134-142. (in Chinese)
- [20] 李佳, 韩昌, 任静, 等. 基于压敏漆的带横槽气膜冷却实验与数值研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(2): 239-242.
LI Jia, HAN Chang, REN Jing, et al. Film cooling performance of the embedded holes in trenches with compound angles[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(2): 239-242. (in Chinese)
- [21] PENG Di, JIAO Lingrui, YU Yuelong, et al. Single-shot lifetime-based PSP and TSP measurements on turbocharger compressor blades[J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58(9): 1-15.
- [22] JULIANO T J, KUMAR P, PENG Di, et al. Single-shot, lifetime-based pressure-sensitive paint for rotating blades[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(8): 085403.1-085403.10.
- [23] 葛宁, 高丽敏, 姜衡, 等. 基于光电传感器的转子叶片表面动态压力光学测量方法: CN111076852B[P]. 2021-04-02.

(编辑: 王碧琚)