

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220565-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220565

频闪照明图像采集法及涂料脉冲发光时间影响

葛 宁^{1,2}, 高丽敏^{1,2}, 李瑞宇³, 欧阳波^{1,2}, 王 磊^{1,2}

- (1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129;
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 710129;
3. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

摘 要: 提出了频闪照明图像采集方法来解决压力敏感涂料测量技术应用于旋转模型的图像采集问题, 根据该方法组建了测量系统。以小型风扇为对象开展了图像采集实验, 探索了涂料脉冲发光时间对图像质量影响。结果表明: 图像运动模糊长度不超过 4 像素时, 图像的清晰度与静止状态的参考图像基本一致。在总涂料发光时间一致时, 涂料脉冲发光时间越短, 图像噪声水平越小, 信噪比越高, 适用于较高轮缘速度的旋转对象。

关 键 词: 旋转模型; 频闪照明; 相位锁定; 压力敏感涂料; 涂料脉冲发光时间; 信噪比; 运动模糊
中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Stroboscopic illumination image acquisition method and influence of the paint pulse luminescence time

GE Ning^{1,2}, GAO Limin^{1,2}, LI Ruiyu³, OUYANG Bo^{1,2}, WANG Lei^{1,2}

- (1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
2. The National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
3. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A method of image acquisition method based on stroboscopic illumination was proposed for measurement of pressure sensitive paint applied to rotating model. In accordance with this method, a measurement system was developed. A small fan was used as the object for the image acquisition experiment, which examined the influence of the paint pulse luminescence time on the quality of the image. The results showed that: when the image motion blur length was not greater than 4 pixels, the image clarity was essentially the same as the reference image in the static condition; with a consistent total paint luminescence time, the shorter paint pulse luminescence time indicated the lower image noise level and the higher signal-to-noise ratio, making it suitable for rotating objects with high speed.

Keywords: rotating model; stroboscopic illumination; phase locking; pressure sensitive paint; paint pulse luminescence time; signal-to-noise ratio; motion blur

叶轮机作为能量转换和动力传递的装置, 全评估至关重要^[1-2], 通常是在气动表面布置测压孔或者安装压力传感器来测量的^[3]。然而, 单点

收稿日期: 2022-08-02

基金项目: 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: 葛宁(1990—), 男, 博士生, 主要从事叶轮机流动显示与测量研究。E-mail: gening@mail.nwpu.edu.cn

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

引用格式: 葛宁, 高丽敏, 李瑞宇, 等. 频闪照明图像采集法及涂料脉冲发光时间影响[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220565. GE Ning, GAO Limin, LI Ruiyu, et al. Stroboscopic illumination image acquisition method and influence of the paint pulse luminescence time[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220565.

“侵入式”测量技术不仅存在测点少以及破坏模型与流场等缺点,而且在气动模型高速旋转时,面临巨大的安全隐患和成本剧增等问题,仅能在低速旋转模型上进行探索性研究^[4]。自 20 世纪 80 年代以来,“非侵入式”压力敏感涂料(pressure sensitive paint, PSP)测量技术^[5-7]具有不破坏流场、高空间分辨率、可覆盖模型全域以及低成本等优势^[8],已在飞机机翼^[9]、平面叶栅^[10]等固定模型上得到了应用。但是应用于旋转模型的测量研究还十分有限。

高质量的图像采集是基于图像测量技术的关键。Kameda 等人^[11]认为低噪声且灵敏度高的探测器进行图像采集有助于提高测量结果的准确性。高丽敏等人^[12]实验研究了测量系统特性对涂料校准的影响,认为照明光源应当具有足够的强度才能充分激发涂料,提高测量精度。Sugioka 等人^[13]分析了涂料发光图像的噪声水平,发现相机噪声和激发光的不稳定问题抑制压力测量精度。

PSP 测量技术本质上是一种弱光技术,涂料的激发程度有限^[14],图像清晰度和信噪比的矛盾成为应用于高速旋转运动的挑战。Kameya 等人^[15]采用与固定模型相同的延长相机曝光时间方法来捕获旋转磁盘表面高信噪比图像,发现较长的曝光时间会造成严重图像旋转运动模糊问题,测量结果退化为沿径向的一维压力分布。为了解决这一问题,一种激光单脉冲寿命技术被 Gregory 等人^[16]和 Juliano 等人^[17]开发出来,由于系统组成相对简单,已在直升机旋翼^[18]、涡轮增压器^[19]等旋转对象上得到了应用。但是,由于涂料衰减时间的限制,应用于高转速对象时,图像运动模糊问题仍不可避免^[20]。图像后处理技术^[21]被用于模糊退化图像的恢复,但是这些技术通常会影响力精度^[22]。另一种解决这一矛盾的图像采集方法是频闪照明锁相增强采集方法^[23]。该方法以极短的光源脉冲发光时间冻结叶片运动降低图像模糊,通过延长相机曝光时间来累积充足的发光信号,提高图像信噪比。这种方法将图像清晰度和信噪比的矛盾问题分解成两个独立问题,分别通过短光源脉冲发光时间与长相机曝光时间得以解决。

然而,目前光源脉冲发光时间的设置严重依赖于研究人员的工程经验,难以实现技术推广。此外,国内有关于旋转模型 PSP 测量技术较少,一直处于探索阶段。本次研究介绍了频闪照明图像采集方法,搭建了图像采集系统。采用具有明

显纹理特征的反光涂料模拟压力敏感涂料发光,通过光源脉冲发光时间来设置涂料脉冲发光时间,在风扇模型开展了图像采集实验。通过改变涂料脉冲发光时间探索图像运动模糊长度对图像质量的影响规律,发现了图像运动模糊长度不超过 4 像素时,图像的清晰度与静止参考图像基本一致,涂料脉冲发光时间越短,图像噪声水平越小,信噪比越高,可为后续开展航空航天领域高速旋转机械气动表面的压力测量奠定基础。

1 频闪照明旋转模型图像采集原理

叶轮机械旋转过程中,相机在曝光时间内与被测叶片之间发生相对运动,使模型表面的光束在感光芯片上产生位移,形成运动模糊图像,捕捉旋转模型表面发光强度 I 可表示为

$$I = \int_0^{t_c} g(t) dt \quad (1)$$

式中 $g(t)$ 是叶片表面单位时间发光强度, t_c 是相机曝光时间。忽略叶片的三维特征,在极坐标系下的相位 ϕ 、半径 r 处,假设单位时间内的模型表面发光强度为 $f(r, \phi)$ 。当光源连续照明时, $g(t)$ 可表示为

$$g(t) = f(r, \phi + \omega t) \quad t \in [0, t_1] \quad (2)$$

其中 ω 为旋转角速度, t_1 是光源的发光时间,图像中模型表面的发光时间为 t_p , 有 $t_p = t_1 = t_c$ 。旋转模型涂料发光图像的运动模糊长度 s 为

$$s = k\omega r t_p \quad (3)$$

其中 k 为图像空间分辨率,与镜头焦距和拍摄距离有关。图像运动模糊长度决定了图像的清晰程度。在测量设备和测量对象确定后,图像运动模糊长度 s 与轮缘速度 ωr 和发光时间 t_p 线性相关。抑制图像运动模糊最直接的方式是缩短 t_p , 但是,根据式(1),这意味着图像强度下降,进而降低图像信噪比。

在稳定的运行工况,旋转模型在同一相位处的表面气动参数相同。旋转模型频闪照明锁相增强图像采集原理如图 1 所示:采用频闪光源以极短的脉冲发光时间 t_1 对旋转模型照明,抑制图像旋转运动模糊;通过相位锁定技术,控制转子每次旋转到同一相位 ϕ 处时光源开始发光,频闪光源的闪光频率与叶片旋转频率一致;设置相机的曝光时间 t_c 足够长,以累积接收 N 次旋转模型短暂发光,提高图像信噪比。由于 PSP 属于荧光或

磷光类发光材料,当光源停止照射后,PSP不会立即停止发光,而是具有一定时间的发光衰减。因此,该方法中相机捕捉的涂料脉冲发光时间为 $t_p = t_1 + \tau$, τ 是光源停止照射后涂料衰减时间。

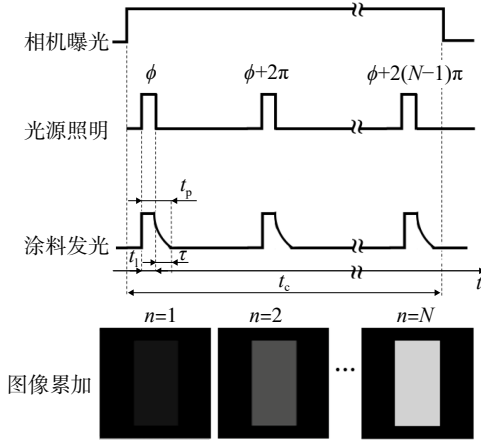


图 1 旋转模型频闪照明锁相增强图像采集原理

Fig. 1 Principle of phase-lock-enhanced image acquisition based on stroboscopic illumination for rotating model

根据测量原理,叶片表面单位时间内发光强度 $g(t)$ 可表示为

$$g(t) = \begin{cases} f(r, \phi + \omega t) & t \in [(n-1)T, (n-1)T + t_p] \\ 0 & t \in [(n-1)T + t_p, nT] \end{cases} \quad (4)$$

其中 $n = 1, 2, 3, \dots, N$, T 是转子旋转周期。

光源频闪次数 N 可以根据静止状态以连续照明方式拍摄到高信噪比、无旋转运动模糊图像的相机曝光时间 t_{ref} 来估计。当 N 满足:

$$N = t_{\text{ref}}/t_p \quad (5)$$

高速旋转状态拍摄图像的总涂料发光时间与静止图像一致。在叶轮机械稳定旋转状态,光源频闪次数 N 可以通过相机曝光时间 t_c 来控制。则式(1)中,包含 N 次光源发光的相机曝光时间 t_c 为

$$t_c = NT \quad (6)$$

频闪照明图像采集方法通过极短的光源脉冲发光时间,抑制图像旋转运动模糊,采用较长的相机曝光时间累积多次相同相位的叶片发光,提高图像信号强度和信噪比。

2 实验装置及实验方案

为了探究涂料脉冲发光时间的影响规律,以

小型风扇模型作为研究对象,开展基于频闪照明的旋转模型锁相增强图像采集实验,评估捕获的旋转模型图像的清晰程度和信噪比。

2.1 研究对象

实验研究对象为如图 2 所示的小型风扇,最大转速为 3 000 r/min,直径为 18 cm,旋转方向为逆时针方向。贴附于轮毂处的反光贴片用于转子相位锁定。由于对压力的敏感性,PSP 在旋转状态和静止状态的发光强度并不相同,不利于通过图像强度和纹理细节分析图像的模糊程度。因此,实验中采用银色反光涂料模拟 PSP 的发光。反光涂料具有更强的“颗粒感”,加深了图像的纹理特征,有利于对图像细节的辨识。但是,银色反光涂料仅能通过漫反射的方式发光,单次发光时长与光源脉冲发光时间一致,不包含涂料的衰减时间。可以通过适当延长光源脉冲发光时间,来模拟 PSP 的实际发光时间,即 $t_1 = t_p$ 。除被测叶片喷涂反光涂料,机身其余部分均喷涂了黑色哑光漆,避免环境光污染。

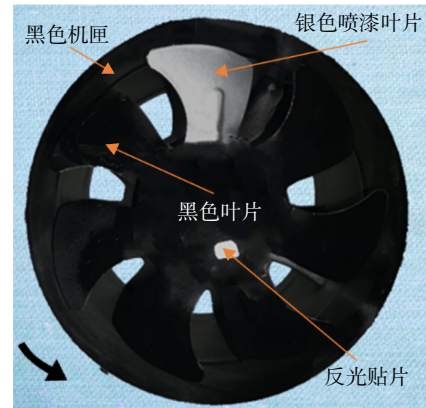


图 2 小型风扇

Fig. 2 Small-scale fan

2.2 测量系统

根据图像采集方法,组建了基于频闪照明的旋转模型锁相增强图像采集测量系统。测量系统主要由相机、锁相传感器、信号发生器、频闪光源以及计算机组成,系统示意图如图 3 所示。

相机选取了 14 位科学级电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)相机,曝光时间为 500 ns~49 d,通过背板制冷技术将暗电流噪声控制为 $0.01 \text{ e}^-/\text{s}$ 。镜头选用焦距 50 mm、光圈 f/1.4D 的尼康定焦镜头。

当旋转模型达到相位 ϕ 时,锁相传感器接受到反光贴片的相位信号,立即向信号发生器发送

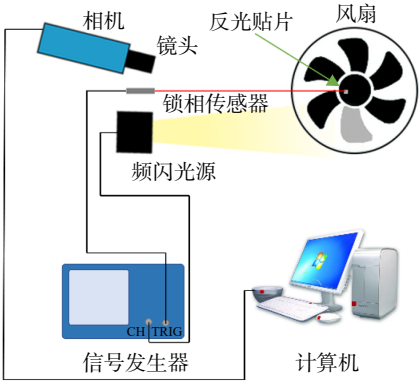


图 3 测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement system

相位锁定信号,由信号发生器同步发出特定宽度的 TTL 信号,触发光源脉冲发光。信号发生器的信号宽度与光源脉冲发光时间相同。

频闪光源是测量系统中的关键组成,根据式(4)可知,频闪照明图像采集方法对频闪光源提出了 3 个要求:①光源脉冲发光时间足够短,以达到抑制运动模糊的目的;②光源发光频率高于转子通过频率,以实现光源在锁相相位处的同步触发;③光源每次脉冲发光强度足够稳定,以降低基于图像强度的 PSP 测量技术的测量误差。实验中选用的频闪光源为定制的 LED 光源,发光频率为 0~50 kHz,覆盖了航空领域旋转部件的转子通过频率。光源单次脉冲发光强度稳定性不低于 99.5%。此外,LED 光源还具备成本低、聚光能力强、发光扩散角度可调及易于采购的优点。

2.3 实验方案

为探索涂料脉冲发光时间对图像质量的影响,以风扇静止状态捕获的静止图像为参考,进行图像模糊、及信噪比分析。反复调整相机曝光时间,使得拍摄的叶片静止图像平均灰度达到约相机灰度最大值一半,以保证图像灰度值在相机高线性度区域以及图像具有充足的信噪比,最终确定参考曝光时间 $t_{\text{ref}}=270\text{ }\mu\text{s}$ 。为了避免相机暗电流噪声以及环境噪声等影响,图像减去以相同曝光时间采集的无光源的背景图像。去掉背景图像的叶片参考图像如图 4 所示,图像中叶片平均灰度为 $B_{\text{ref}}=8\text{ }267$,图像空间分辨率 $k=0.1\text{ mm/像素}$ 。

为了验证频闪照明图像采集方法与测量系统的对旋转运动模型的图像采集能力,在风扇 2 700 r/min 转速下开展了旋转模型图像采集实验,锁相相位与静止图像相同。在旋转状态采集的图像中,叶片尾缘的运动方向为 x 负方向。图 4 尾缘虚线

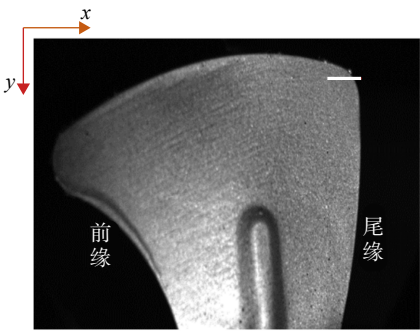


图 4 叶片静止图像

Fig. 4 Image of the blade at static condition

区域约为叶片的 97% 叶高处,包含了叶片区域、背景区域和叶片与背景的边缘过渡区域。该区域的轮缘速度接近最大约为 24.6 m/s,图像边缘对模糊最为敏感,因此,对于旋转状态采集的图像均采用相同红线区域的强度分布来估计图像模糊程度。

频闪照明图像采集方法设置的 9 种包含涂料衰减时间和光源脉冲发光时间的涂料脉冲发光时间设置如表 1 所示。本文图像采集系统定制光源的最短脉冲发光时间是 0.5 μs ,涂料脉冲发光时间更短,能够适应更高的旋转轮缘速度。根据已有的图像采集测试,当脉冲发光时间超过 67.5 μs ,即使轮缘速度不高,捕获的图像中仍存在一定程度的运动模糊。因此,实验中采用涂料脉冲发光时间的范围为 0.5~67.5 μs 的 9 种设置,探索涂料脉冲发光时间对图像模糊以及信噪比的影响规律。

表 1 图像采集方案

Table 1 Image acquisition scheme

序号	$t_p/\mu\text{s}$	N	t_c/s
1	0.5	540	12
2	2	135	3
3	5	54	1.2
4	10	27	0.6
5	18	15	0.33
6	27	10	0.22
7	45	6	0.13
8	54	5	0.11
9	67.5	4	0.09

实验控制总涂料发光时间与静止图像一致,光源频闪次数 N 和相机曝光时间 t_c 分别根据式(5)和式(6)计算得到。每幅图像分别减去在旋转状态下以相同曝光时间、关闭光源的暗背景图像,以消除环境噪声和相机暗电流噪声。

3 结果分析与讨论

3.1 图像旋转运动模糊分析

图 5 展示了基于频闪照明的旋转模型锁相增强图像采集结果。图像上叶片轮廓能够准确识别,在总涂料发光时长一致时,信号强度基本与静止图像一致。涂料脉冲发光时间在 $0.5 \sim 18 \mu\text{s}$ (如图 5(a) 和图 5(b)) 范围内,转子叶片图像非常清晰,颗粒状的纹理与静止图像基本相同,无明显运动模糊特征;当涂料脉冲发光时间的延长到 $27 \mu\text{s}$ 时,图 5(c) 出现轻微模糊,对图像上纹理细节的识别能力减弱;当脉冲发光时间达到 $67.5 \mu\text{s}$ 时,图 5(d) 的图像模糊程度进一步加剧,图像纹理不易识别。

图 6 展示了叶片静止图像(如图 4 所示)和 5 种设置旋转图像分别在 97% 叶高处尾缘区域(如图 4 所示的红线区域)的灰度曲线,以图 4 叶片静止图像平均灰度 $B_{\text{ref}} = 8267$ 归一化。灰度曲线沿像素 x 坐标根据灰度值可分成 3 个部分,分别是叶片区域、过渡区域和背景区域,其中,5 种涂料脉冲发光时间拍摄的图像灰度曲线的过渡区域采用彩色背景表示。由曲线结果可知,涂料脉冲发光时间在 $0.5 \mu\text{s}$ 时,与参考图像灰度曲线基本重合;涂料脉冲发光时间在 $5 \sim 18 \mu\text{s}$ 范围内,尽管过渡区域在逐渐拓宽,但是与参考图像灰度曲线仍然具有相似性,能够反映图像细节;涂料脉冲发光时间在 $27 \mu\text{s}$ 时,灰度趋于平坦,涂料脉冲发光

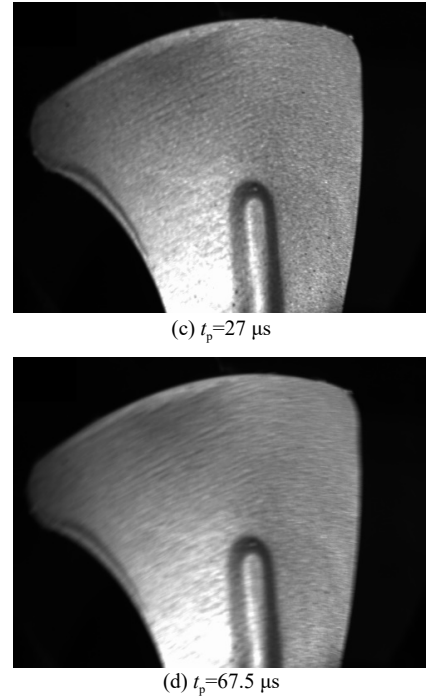


图 5 基于频闪照明的旋转模型锁相增强图像采集结果
Fig. 5 Results of phase-lock-enhanced image acquisition based on stroboscopic illumination for rotating model

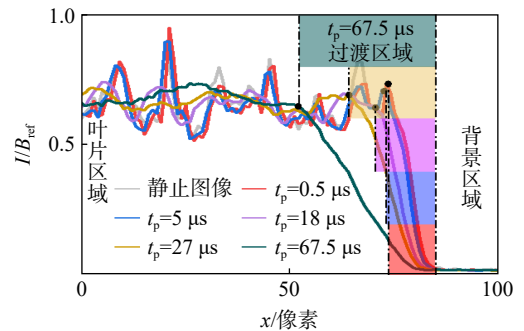
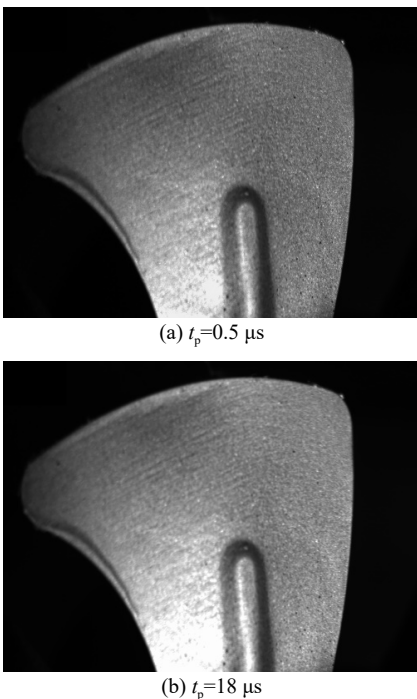


图 6 97% 叶高尾缘区域灰度曲线
Fig. 6 Grayscale curve of 97% blade span at trailing edge area

时间达到 $67.5 \mu\text{s}$ 时,过宽的过渡区域和趋于水平线的灰度曲线难以反映叶片的纹理细节。

图 7 展示了 97% 叶高处图像运动模糊长度,通过 9 种涂料脉冲发光时间过渡区域宽度减去参考图像宽度过渡区域宽度得到。实验提取的运动模糊长度与式(3)的理论计算结果基本一致,在较低的涂料脉冲发光时间 $t_p = 0.5 \sim 2 \mu\text{s}$,涂料发光期间叶片运动距离较短,在图像上未能超过 1 个像素,因此 $t_p = 0.5 \sim 2 \mu\text{s}$ 范围内的 $s=1$ 像素;当图像空间分辨率 k 与转速确定时,图像的运动模糊长度随着涂料脉冲发光时间呈线性增长;当涂料脉冲发光时间 $t_p \leq 18 \mu\text{s}$ 时,图像的运动模糊长度 $s \leq 4$ 像素,图像的清晰度与静止“无模糊”的参考图



像基本一致;当涂料脉冲发光时间 $t_p > 18 \mu\text{s}$, 图像运动模糊长度 s 超过 4 像素后, 运动模糊程度随涂料脉冲发光时间逐渐提升;当 $t_p = 67.5 \mu\text{s}$ 时, 图像运动模糊长度达到 15 像素, 图像纹理细节难以辨识。

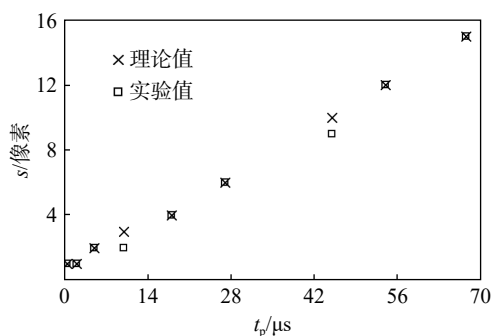


图 7 9 种涂料脉冲发光时间的图像运动模糊长度

Fig. 7 Image motion blur length of 9 paint pulse luminescence time

3.2 图像信噪比分析

频闪照明图像采集方法的图像噪声主要是由于相机曝光时间和环境噪声引起的, 尽管进行了背景噪声去除处理, 仍有部分噪声保留在图像上。图像噪声 B_n 可以采用图像上“黑色”背景区域的空间平均灰度表示。图像上叶片区域的发光强度 I 也包含了这部分噪声, 因此叶片有效信号 B_s 可表示为

$$B_s = I - B_n \quad (7)$$

以图 4 静止图像的叶片灰度 $B_{\text{ref}} = 8267$ 为参考, 9 种脉冲发光时间图像噪声如图 8 所示。频闪照明图像采集方法, 在光源照明总时长一致时, 涂料脉冲发光时间在 $0.5 \mu\text{s}$ 时的背景区域噪声最小, 仅为参考图像信号强度的 1.3%; 随涂料脉冲发光时间增加, 噪声水平略有增加, 当涂料脉冲发光时间超过 $10 \mu\text{s}$, 噪声水平稳定在参考图像信号强度的 2%。

图像信噪比 S/N 是图像上信号强度与噪声水平之比, 可用下列公式描述:

$$S/N = 10 \times \lg \frac{B_s}{B_n} \quad (8)$$

图 9 展示了 9 种涂料脉冲发光时间图像信噪比。当涂料脉冲发光时间为 $0.5 \mu\text{s}$ 时, 图像信噪比最高, 接近 18; 图像信噪比随涂料脉冲发光时间延长而降低, 当涂料脉冲发光时间达到 $10 \mu\text{s}$ 时, 图像信噪比基本稳定在 17。涂料脉冲发光时间

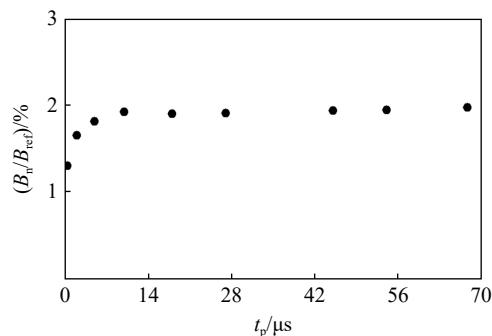


图 8 9 种涂料脉冲发光时间图像噪声

Fig. 8 Image noise of 9 paint pulse luminescence time

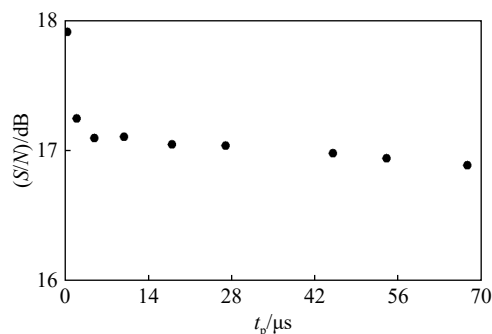


图 9 9 种涂料脉冲发光时间图像信噪比

Fig. 9 Image SNR of 9 paint pulse luminescence time

越短, 旋转模型图像越清晰, 信噪比越高。根据式(3), 在保证描述图像运动模糊长度 s 不变的前提下, 越短的脉冲发光时间意味着该方法适应更高的叶片轮缘速度。

4 结 论

1) 针对转子压力敏感涂料测量技术对高信噪比、低运动模糊的图像质量需求, 介绍了频闪照明图像采集方法, 组建了测量系统, 采用银色反光涂料模拟涂料发光强度, 采用光源脉冲发光时间模拟涂料脉冲发光时长。对转速为 2700 r/min 小型风扇转子进行图像锁相增强采集, 实验结果验证了方法和图像采集系统的有效性。

2) 相同的涂料脉冲发光时间条件下, 实验测得的图像运动模糊长度与理论计算的运动模糊长度基本一致, 涂料脉冲发光时间越长, 图像模糊程度越高; 对于本文研究对象, 当涂料脉冲发光时间不超过 $18 \mu\text{s}$ 时, 图像运动模糊程度较低, 清晰程度与静止叶片图像基本相同; 当涂料脉冲发光时间超过 $18 \mu\text{s}$ 后, 运动模糊程度逐渐提升; 当涂料脉冲发光时间超过 $67.5 \mu\text{s}$ 时, 图像运动模糊长度达到 15 像素, 图像纹理细节难以辨识; 图像运动模糊长度不超过 4 像素时, 可实现旋转模型

图像的高质量采集。

3) 采用频闪照明图像采集方法, 涂料总发光时间保持一致, 对于本文研究对象, 当涂料脉冲发光时间在 $0.5\ \mu\text{s}$ 时, 图像噪声水平仅为参考图像信号强度的 1.3%, 图像信噪比接近 18; 当涂料脉冲发光时间超过 $10\ \mu\text{s}$, 噪声水平稳定在 2%, 图像信噪比接近 17; 涂料脉冲发光时间越短, 图像噪声越小, 信噪比越高, 适用于高速旋转模型图像采集。

参考文献:

- [1] LI Ruiyu, ZHAO Lei, GE Ning, et al. Grid resolution assessment method for hybrid RANS-LES in turbomachinery[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2022, 16(1): 279-295.
- [2] MAO X, LIU B, YUAN F. Numerical and experimental study of separation control by boundary layer aspiration in a highly-loaded axial compressor cascade[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2018, 11(2): 433-446.
- [3] AINSWORTH R W, MILLER R J, MOSS R W, et al. Unsteady pressure measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(7): 1055-1076.
- [4] 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)
- [5] LIU T, SULLIVAN J P. Pressure and temperature sensitive paints [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [6] GREGORY J W, SAKAUE H, LIU Tianshu, et al. Fast pressure-sensitive paint for flow and acoustic diagnostics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46: 303-330.
- [7] PENG Di, LIU Yingzheng. Fast pressure-sensitive paint for understanding complex flows: from regular to harsh environments[J]. *Experiments in Fluids*, 2019, 61(1): 1-22.
- [8] 高丽敏, 吴亚楠, 胡小全, 等. 基于光强的快速响应 PSP 动态测量技术及其应用[J]. *航空学报*, 2014, 35(3): 607-623.
GAO Limin, WU Yanan, HU Xiaoquan, et al. Intensity-based fast response PSP technique and its applications[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(3): 607-623. (in Chinese)
- [9] 熊健, 李国帅, 周强, 等. 2.4 m 跨声速风洞压敏漆测量系统研制与应用研究[J]. *实验流体力学*, 2016, 30(3): 76-84.
XIONG Jian, LI Guoshuai, ZHOU Qiang, et al. Development and application of pressure sensitive paint system in 2.4 m transonic wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(3): 76-84. (in Chinese)
- [10] 高丽敏, 高杰, 王欢, 等. PSP 技术在叶栅叶片表面压力测量中的应用[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(3): 411-414.
GAO Limin, GAO Jie, WANG Huan, et al. Application of PSP technique to pressure measurement on cascade surface[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(3): 411-414. (in Chinese)
- [11] KAMEDA M, TABEI T, NAKAKITA K, et al. Image measurement of unsteady pressure fluctuation on a delta wing by an anodized aluminum PSP[J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(12): 2517-2524.
- [12] 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)
- [13] SUGIOKA Y, HIURA K, CHEN Lin, et al. Unsteady pressure-sensitive-paint (PSP) measurement in low-speed flow: characteristic mode decomposition and noise floor analysis[J]. *Experiments in Fluids*, 2019, 60(7): 1-17.
- [14] WONG O D, WATKINS A N, GOODMAN K Z, et al. Blade tip pressure measurements using pressure-sensitive paint[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 2012, 4: 2795-2808.
- [15] 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.
- [16] GREGORY J, KUMAR P, PENG Di, et al. Integrated optical measurement techniques for investigation of fluid-structure interactions[R]. AIAA 2009-4044, 2009.
- [17] 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.
- [18] 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, 54(1): 206-215.
- [19] 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): 127.1-127.15.
- [20] 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(9): 120.1-120.20.
- [21] PANDEY A, GREGORY J W. Iterative blind deconvolution algorithm for deblurring a single PSP/TSP image of rotating surfaces[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 3075.
- [22] WEISS A, GEISLER R, MÜLLER M M, et al. Dynamic-stall measurements using time-resolved pressure-sensitive paint on double-swept rotor blades[J]. *Experiments in Fluids*, 2021, 63(1): 1-18.
- [23] BURNS S P, SULLIVAN J P. The use of pressure sensitive paints on rotating machinery[C]//ICIASF '95 Record. International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities. Piscataway, US: IEEE, 2002: 32/1-3214.

(编辑: 陈 越)