文章编号：1672-9897(2026)01-0107-10 doi: 10.11729/syltlx20230161

考虑温度影响的 PSP 动态校准方法及特性研究

刘强[1, 2]，李强[1]，魏春华[2]，尹熹伟[2]，蒋海林[2]，梁磊[2, *]

1. 西南科技大学 信息与控制工程学院，绵阳 621010

2. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力研究所，绵阳 621000

摘要：快响应压敏涂料（Pressure-Sensitive Paint, PSP）的动态特性及温度对其特性的影响规律，是判断快响应 PSP 是否适用于非定常流场的关键依据。本文提出了快响应 PSP 动态校准方法，采用能够调节温度和频率的动态校准系统建立可控校准驻波场，系统开展了温度对所研制的聚合物陶瓷压敏涂料（Polymer Ceramic Pressure-Sensitive Paint, PC–PSP）压力灵敏度和频响特性的影响研究。结果表明，动态校准比静态校准能够更为准确地反映快响应涂料的特性。频率变化对 PC–PSP 压力灵敏度有显著影响；温度对 PC–PSP 压力灵敏度的影响虽不明显，但在实际测量中不可忽视 PSP 的温度敏感度。同一温度下，随着频率增大，增益减小，相位滞后现象逐渐增强；不同温度下，随着温度升高，截止频率增大，相位滞后现象逐渐减弱。实验测得 PC–PSP 在 20 ℃、0.5 kHz 下的动态压力灵敏度为 0.59%/kPa，在 20 ℃、3.0 kHz 下动态压力灵敏度为 0.51%/kPa，截止频率为 4.8 kHz。PC–PSP 性能稳定，满足低速风洞非定常试验的工程要求。

关键词：快响应 PSP；聚合物陶瓷压敏涂料；动态校准；驻波场；温度影响；压力灵敏度；动态特性

中图分类号：V211.7 **文献标识码：**A

The dynamic calibration method of PSP and its characteristics research considering the influence of temperature

LIU Qiang[1, 2], LI Qiang[1], WEI Chunhua[2], YIN Xiwei[2], JIANG Hailin[2], LIANG Lei[2, *]

1. School of Information and Control Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2. Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China

Abstract: The dynamic characteristics and temperature effects of fast-response pressure-sensitive paint are the key factors for determining whether it is applicable to unsteady flow fields. This paper proposes a method for dynamic calibration of fast-response PSP (Pressure-Sensitive Paint), establishes a controllable calibration standing wave field through a dynamic calibration system that can adjust the temperature and frequency, and researches on the influence of temperature on pressure sensitivity and frequency response characteristics of the developed PC–PSP (Polymer Ceramic Pressure-Sensitive Paint). Dynamic calibration reflects the PSP characteristics more accurately than static calibration. Frequency changes have a significant effect on the pressure sensitivity of PC–PSP, and the influence of temperature on the pressure sensitivity of PC–PSP is not significant, while the temperature sensitivity of PC–PSP cannot be ignored in measurement. At the same temperature, the gain decreases and the phase lags behind as the frequency increases. At different temperatures, with the increase of the temperature, the cut-off frequency increases, and the phase lag gradually weakens. The dynamic pressure sensitivity at 20 ℃ and

收稿日期：2023-11-20；**修回日期：**2024-02-01；**录用日期：**2024-02-04

基金项目：国家自然科学基金项目（12202476）；国家重点研发计划项目（2020YFA0405700）

* 通信作者 E-mail: skywork@163.com

引用格式：刘强, 李强, 魏春华, 等. 考虑温度影响的 PSP 动态校准方法及特性研究 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(1): 107-116.
LIU Q, LI Q, WEI C H, et al. The dynamic calibration method of PSP and its characteristics research considering the influence of temperature[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(1): 107-116.

0.5 kHz is 0.59%/kPa, and at 20 ℃ and 3 kHz is 0.51%/kPa, with the cut-off frequency being 4.8 kHz. Therefore, the performance of the tested PC–PSP is stable and meets the engineering requirements for unsteady flow field pressure measurement tests in low-speed wind tunnels.

Keywords: fast-response PSP; Polymer Ceramic Pressure-Sensitive Paint (PC–PSP); dynamic calibration; standing wave field; temperature influence; pressure sensitivity; dynamic characteristics

0 引 言

测压试验是飞行器设计不可或缺的关键环节。受结构和运动等因素限制，传统测压技术难以获取直升机旋翼桨叶、发动机叶片、薄机翼边缘等表面的非定常气动载荷分布。压敏漆（Pressure-sensitive Paint, PSP）技术是20世纪80年代发展起来的一种非接触光学测压技术[1]。该技术基于待测模型表面发光涂层分子在特定波长激发光照射下，其荧光强度随压力变化的原理，将压力大小转化为光强信息后再进行图像处理，进而计算出模型表面压力分布。该技术具有空间分辨率高、不受模型结构限制、不破坏模型表面流场、可实现大面积压力分布测量等优点，目前已成为飞行器风洞试验中大面积测压和流动显示的重要工具[2]。

进入21世纪，快响应压敏漆（Fast-Response Pressure-Sensitive Paint）技术逐步完善。当前使用较多的快响应PSP包括薄层色谱板压敏涂料（Thin-Layer Chromatography PSP, TLC–PSP）、阳极氧化铝压敏涂料（Anodized-Aluminum PSP, AA–PSP）和聚合物陶瓷压敏涂料（Polymer Ceramic PSP, PC–PSP）等，其响应时间为几十微秒量级，具有高空间分辨率和高频响特性，可用于空气动力学、声学研究[3]及飞行器研制。

快响应PSP技术主要包括寿命法和光强法。Dong[4]、魏春华[5]等采用单脉冲寿命法测量直升机旋翼、螺旋桨表面压力分布，获得了部分相位的瞬时压力图像。寿命法信噪比高，不受模型运动影响，但有效数据图像较少。Nakakita[6]、Crafton[7]、Gordeyev[8]、Davis等[9]等则采用光强法测量与表征了不同环境下的非定常流场脉动压力，获得了高时间解析的序列压力图像。通过对比分析非定常压力的平均场和瞬时场，研究识别了不同模型表面压力波动的结构特征和模式，验证了快响应PSP的高频解析能力以及模型表面瞬时场与平均压力场的一致性。从相关研究结果来看，温度和频响特性无疑是影响风洞试验精度和快响应PSP应用范围的重要因素。因此，有必要通过可调节温度和频率的校准装置，研究快响应PSP传递函数和频响特性的变化规律。

通常做法是，采用静态校准装置获取PSP传递函数并研究温度对其影响规律，采用动态校准装置（如激波管[10-11]、驻波管[12-14]等）研究PSP频响特性。静态校准装置搭建简单，但难以表征快响应PSP传递函数的动态特性。Casper等[15]研究发现，相较于假设频率恒定的静态校准，使用驻波管和激波管进行动态校准可以更好地理解PSP的频响限制。McMullen[16]、Pandey[17]等采用驻波管研究了PSP表面粗糙度、涂覆方法、光密度和激发波长等因素的影响，推导了理论简化模型，研究结果表明，需同时考虑发光寿命和扩散机制的影响才能确定PC–PSP的传递函数。高丽敏等[18-19]使用驻波管对某型PSP进行了动态特性校准，测得其最高截止频率为9.1 kHz。在上述研究工作中，驻波管装置均未加装温度控制模块，未开展温度对频响特性的影响研究。Sugimoto等[20]在驻波管系统上安装了珀尔帖模块以控制PSP样片温度，发现PC–PSP的响应时间随温度升高而缩短，其频率特性的主导因素是发光寿命，传递函数可用一阶系统近似，但尚未系统开展温度对传递函数和频响特性的影响研究。

在低速风洞中进行的固定翼飞机脉动压力试验和直升机旋翼、螺旋桨等表面压力分布试验中，模型表面非定常压力波动小、变化快，且存在一定的温度梯度。这要求快响应PSP兼具高灵敏度与高频响特性，也要求补偿温度对PSP压力灵敏度与频响特性的影响。为此，本文提出了快响应PSP动态校准方法，基于带有温度调节单元的大振幅驻波管型PSP动态校准系统建立校准驻波场，系统开展温度对所研制的PC–PSP压力灵敏度和频响特性的影响研究，为后续风洞试验的工程应用奠定基础。

1 实验设置

1.1 动态校准系统

带有温度调节单元的大振幅驻波管型PSP动态

校准系统主要由驻波管、正弦压力发生装置(包括函数信号发生器、功率放大器、扬声器等)、温度调节单元、PSP 测量单元等组成，如图 1 所示。

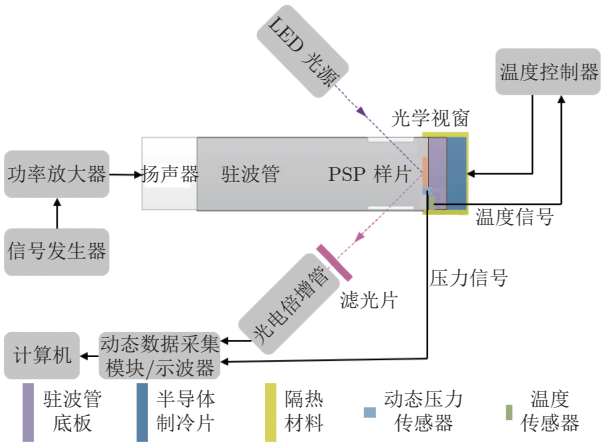


图 1　动态校准系统示意图

Fig. 1　Scheme of dynamic calibration system

驻波管校准舱本体由内径 50 mm 的无缝钢管加工而成，总长 340 mm，长度可调。光学视窗为内径 50 mm 的石英玻璃管。图 2 为驻波管实物图，驻波管基频(fundamental frequency)$f_f = 0.5$ kHz。

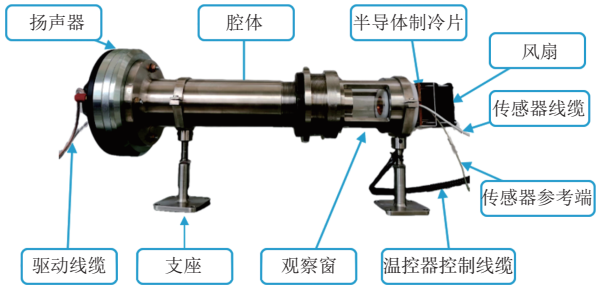


图 2　驻波管实物图

Fig. 2　Photo of standing wave tube

正弦压力信号由函数信号发生器、功率放大器和扬声器共同产生：函数信号发生器产生指定频率和幅值的正弦波电信号；功率放大器对输入的正弦波电信号进行有效放大后输出，驱动扬声器工作；扬声器通过自身锥盆振动为驻波管校准舱提供一定压强和频率的正弦型动态压力波。扬声器驱动工作频率范围为 0.5～20 kHz。

温度调节单元主要由半导体制冷片、温度控制器、风扇、温度传感器等组成。温度控制器采用 PID 调节算法控制通过半导体制冷片的电流，从而精确控制半导体制冷片工作端的温度。温度调节单元可在 5～60 ℃ 范围内设置任意温度进行实验，温度分辨率为 0.01 ℃。

PSP 测量单元包括 LED 光源、光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)、动态压力传感器、动态数据采集模块、示波器、PSP 样片等。其中，LED 光源主波长为 405 nm；PMT 的光谱响应波长为 230～920 nm，带宽为 0～20 kHz，配置滤光片以获得 PSP 样片激发的荧光信号。动态压力传感器选用 ENDEVCO 的 8510B–2，采集方式为差压，量程为 2 psi(约 13.79 kPa)；动态数据采集模块的采样率 200 kS/s/ch，A/D 分辨率为 18 位。图 3 为动态校准系统实物图。

驻波管尾部为试验段，布置了 1 支动态压力传感器并安装了 PSP 样片。样片安装于驻波管尾部中心，动态压力传感器安装于样片侧方 10 mm 处，用于测量样片表面的动态压力信号。传感器端面与样片喷涂面平齐，以确保两者能同时感受管内压力。

1.2　校准系统性能测试

以驻波管基频的各倍频作为工作频率 f($f = nf_f$, $n = 1, 2, \ldots$; $f_f = 0.5$ kHz)，对管内形成的正弦动态压力进行测量，采样频率为 200 kHz。测量过程中，函数信号发生器产生的信号幅值在各工作频率下保持不变。

将动态压力传感器的输出信号经 50 kHz 硬件低通滤波以去除高频噪声后作为原始信号，再对其进行工作频率 $f \pm 10\%f$ 的带通滤波，获得校准系统的时域图。

通过 FFT 变换将原始信号转换为频谱图，记录

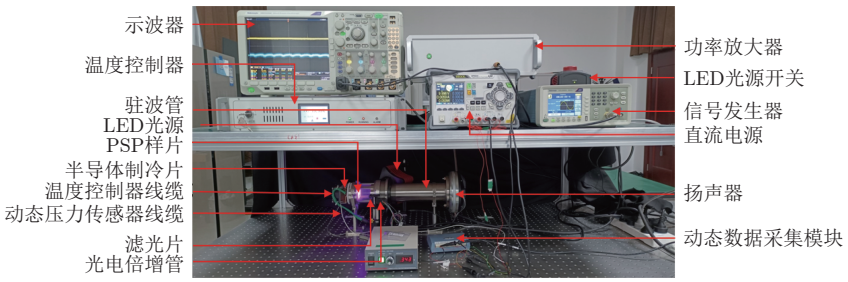


图 3　动态校准系统实物图

Fig. 3　Photo of dynamic calibration system

各工作频率下的压力振幅，得到系统的共振谱图，确定校准系统的最大压力幅值和有效工作频率范围。

1.3 PC–PSP 动态特性实验

将以 PtTFPP 为探针分子的 PC–PSP 喷涂于直径 20 mm、厚 2 mm 的圆形铝片上，制成校准样片。在环境光下，样片呈粉灰色；在 405 nm 激发光照射下则呈紫色，如图 4 所示。PC–PSP 被激发后的发射光谱为 650 nm，位于红光区。



图 4 PC–PSP 样片激发前后图像
Fig. 4 Image of PC–PSP sample before and after excitation

调整 LED 光源和 PMT 的位置，确保 PMT 能够最大程度地采集样片的发光信号。利用动态数据采集模块同步存储 PMT 和动态压力传感器的信号，以供后续处理。

校准现场如图 5 所示。依次设置样片校准温度为 10、20、30 和 40 ℃，待温度稳定后，打开光源，以驻波管基频的各倍频 f（$f = nf_{\mathrm{f}}$, $n = 1, 2, \ldots$; $f_{\mathrm{f}} = 0.5$ kHz）作为工作频率，对 PC–PSP 进行动态校准。测试不同频率、不同温度下 PC–PSP 的压力灵敏度，分析温度对 PC–PSP 截止频率和相位的影响。

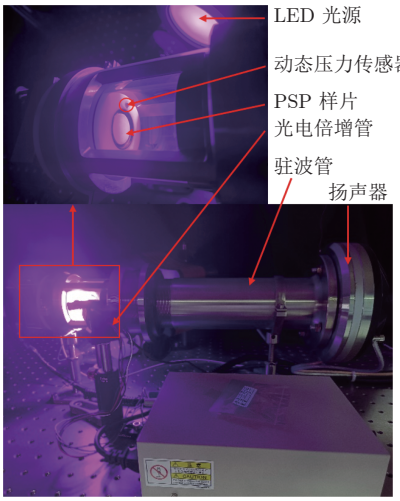


图 5 PC–PSP 动态校准实验现场
Fig. 5 PC–PSP dynamic calibration experimental site

2 动态校准方法

2.1 校准驻波场建立

理想的快响应 PSP 动态校准需建立大振幅驻波场。等截面驻波管是获取大振幅驻波场结构最简单的声学装置。声波在等截面圆柱管道内的传播形式为平面波。当声源发射单频正弦或余弦信号时，可采用下式估算圆柱管中平面波的截止频率 f_{c}：

$$f_{\mathrm{c}} = kc_0/(2\pi r) \tag{1}$$

式中：c_0 为声速，r 为驻波管内腔半径。

理想情况下，若采用对称振动声源（如纸盆扬声器），取 $k = 3.832$，此时截止频率 $f_{\mathrm{c}} = 8.30$ kHz。若难以保证声源作轴对称振动，则取 $k = 1.840$，此时 $f_{\mathrm{c}} = 3.98$ kHz。当驻波管声源工作频率低于截止频率时，管内仅产生平面波；当声源工作频率高于截止频率时，除平面波外，管内还会产生其他高阶波，此时需分析管内驻波场情况。

采用 FLUENT 软件对驻波管的截面进行二维压力计算，湍流模型选择 SST k–ω 模型，使用有限体积法计算，空间离散采用二阶迎风格式。周期性正弦压力波动使用自编译 UDF 函数生成，设定为 $p_1 = p_{\mathrm{max1}}\sin(2\pi ft)$（$p_{\mathrm{max1}}$、$f$ 分别为压力波动 p_1 的振幅和频率），并选择压力源侧作为正弦压力波进口。设定 $p_{\mathrm{max1}} = 200$ Pa，各边界设置为绝热壁面，下边界为二维旋转轴。总压为 1 个标准大气压（即 101 325 Pa），总温为 300 K。

对驻波管施加频率为 5 kHz 的正弦压力波动，管内各处动态压力达到最大值时的压力波动分布如图 6 所示。由于工作频率 5 kHz 是基频 0.5 kHz 的 10 倍频，10 个压力波峰和波谷交替出现于整个驻波管内。从图中可以看出：声波在传输过程中虽有一定能量损耗，但在 5 kHz 时仍能形成稳定的驻波场，满足校准使用条件。

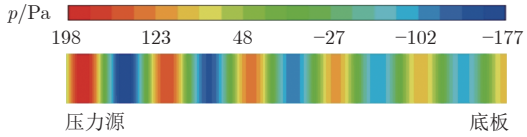


图 6 f = 5 kHz 时驻波管内压力波动分布图
Fig. 6 Pressure fluctuation distribution chart of standing wave tube at f = 5 kHz

2.2 动态校准曲线及参数获取

将动态压力传感器的输出信号经 50 kHz 硬件低通滤波去除高频噪声后作为原始信号，再对其进行工作频率 $f \pm 10\%f$ 的带通滤波。在 1 个周期内，以波峰为起点按固定相位差取 n 个值，依次作为相位 $\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_n$ 下的动态压力 p_i（$i = 1, 2, \ldots, n$）。以大气压力传感器获取的大气压力作为参考压力 p_{ref}。

快响应 PSP 响应动态压力变化过程中存在相位

滞后现象[18]，若直接取时序上与动态压力对应的动态光强会引入误差。对 PMT 输出信号进行工作频率 $f \pm 10\%f$ 的带通滤波获取交流分量，以波谷为起点按固定相位差取 n 个值，依次作为相位 φ_1, φ_2, ..., φ_n 下的动态光强 $I_i(i = 1, 2, ..., n)$。以压力变化和光强变化的完整周期进行数据取值，保证动态压力 p_i 与动态光强 I_i 在 1 个周期内相位匹配。以 PMT 输出信号的直流分量作为参考光强 I_{ref}。

本文取 $n = 12$，对动态压力传感器滤波信号和 PMT 滤波信号以 30°相位差选取 12 个值，依次作为相位 φ_1, φ_2, ..., φ_{12}。图 7 为信号取值位置示意图。

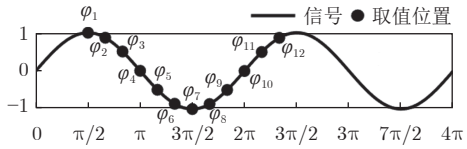


图 7　信号取值位置示意图

Fig. 7　Schematic diagram of signal value location

压力灵敏度和截止频率是评价快响应 PSP 能否应用的重要指标。压力灵敏度体现了快响应 PSP 对压力的分辨能力，其值越高，则分辨能力越强。将动态光强值 I_i、动态压力值 p_i、参考光强 I_{ref}、参考压力 p_{ref} 代入 Stern–Volmer 公式：

$$I_{\mathrm{ref}}/I_i = A + Bp_i/p_{\mathrm{ref}} \tag{2}$$

通过式(2)可得到 12 个关于系数 A、B 的方程，进而采用最小二乘法计算得到 A 与 B 的值。对式(2)求导，得到 B 的表达式：

$$B = \partial(I_{\mathrm{ref}}/I)/\partial(p/p_{\mathrm{ref}}) \tag{3}$$

压力灵敏度 S_p 定义为：

$$S_p = \Delta(I_{\mathrm{ref}}/I)/\Delta p \tag{4}$$

将式(3)代入式(4)，得 PSP 的压力灵敏度：

$$S_p = [\partial(I_{\mathrm{ref}}/I)/\partial(p/p_{\mathrm{ref}})]/p_{\mathrm{ref}} = B/p_{\mathrm{ref}} \tag{5}$$

信号增益 G_{ain} 定义如下：

$$G_{\mathrm{ain}} = 20\lg(\Delta p_{\mathrm{out}}/\Delta p_{\mathrm{in}}) \tag{6}$$

式中：Δp_{in} 为 PSP 表面感受的输入压力，即动态压力传感器测得的动态校准系统压力波动幅值；Δp_{out} 为由 PSP 测得的动态光强 I_i 换算出的压力幅值。

对式(2)求导并写作差分形式：

$$I_{\mathrm{ref}}\Delta(1/I) = B\Delta p/p_{\mathrm{ref}} \tag{7}$$

由式(2)可知，Δp_{out} 为：

$$\Delta p_{\mathrm{out}} = I_{\mathrm{ref}}p_{\mathrm{ref}}\Delta(1/I)/B \tag{8}$$

将式(8)代入式(6)得到：

$$G_{\mathrm{ain}} = 20\lg[I_{\mathrm{ref}}p_{\mathrm{ref}}\Delta(1/I)/(B\Delta p_{\mathrm{in}})] \tag{9}$$

将式(9)转为连续形式：

$$G_{\mathrm{ain}} = 20\lg\left[\frac{\partial(I_{\mathrm{ref}}/I)}{\partial(p_{\mathrm{in}}/p_{\mathrm{ref}})} \times \frac{1}{B}\right] \tag{10}$$

通过式(10)括号内乘号左边项，可求得 Δp_{in} 对应频率下的参数 B。将不同工作频率下对应的参数 B 代入式(10)，可计算得到信号增益：

$$G_{\mathrm{ain}} = 20\lg(B_j/B_0) \tag{11}$$

式中：B_j 为第 j 个工作频率下的计算值；B_0 为 PSP 在静态压力下的计算值，此处将 B_1 替代 B_0 代入公式计算。快响应 PSP 是分子级动态压力传感器，取增益为−3 dB 时对应的动态压力频率作为截止频率。

3　结果与讨论

3.1　校准系统性能测试结果

以驻波管工作频率 f = 0.5、1.5、10、20、30、40 kHz 为例，给出动态压力传感器的原始信号及带通滤波后的时域图(图 8)。对图 8 中的动态压力传感器原始信号进行 FFT 变换，得到频谱图(图 9)。图中 p_{max2} 为动态校准系统中动态压力传感器输出的最大压力幅值(1.5 kHz 时对应的幅值)。

从图中可以看出：随着频率增大，管内驻波强度逐渐减弱，信噪比逐渐降低。当频率低于截止频率时，高阶波抑制效果明显；高于截止频率时，高阶波逐渐增强，不可忽略。从图 8(a)～(c)和图 9(a)～(c)可以看出：当工作频率 $f \leqslant 10$ kHz 时，管中驻波主频信号与所设定的输入信号工作频率完全一致，管内高阶波基本被抑制；当工作频率 f = 10 kHz 时，原始信号中出现了强度较小的高阶波，但仍可清晰识别工作主频信号。这表明驻波场声源处于对称振动状态，形成的驻波场符合截止频率 f_{c} = 8.30 kHz 的理论计算结果。

从图 8(d)～(f)和图 9(d)～(f)可以看出：当工作频率 f 为 20、30 kHz 时，驻波主频信号强度减弱，管内高阶波强度增强，频率范围增大，但工作主频分量依然占信号主要部分；当工作频率 f = 40 kHz 时，主频信号强度继续减弱，高阶波继续增强，部分高阶波强度接近驻波强度，已很难清晰识别主频信号。其主要原因在于：一是声源工作频率高于截止频率后，管内除沿轴向传播的平面波外，还激发出不同振动方向的若干组平面波，经刚性管壁多次反射后

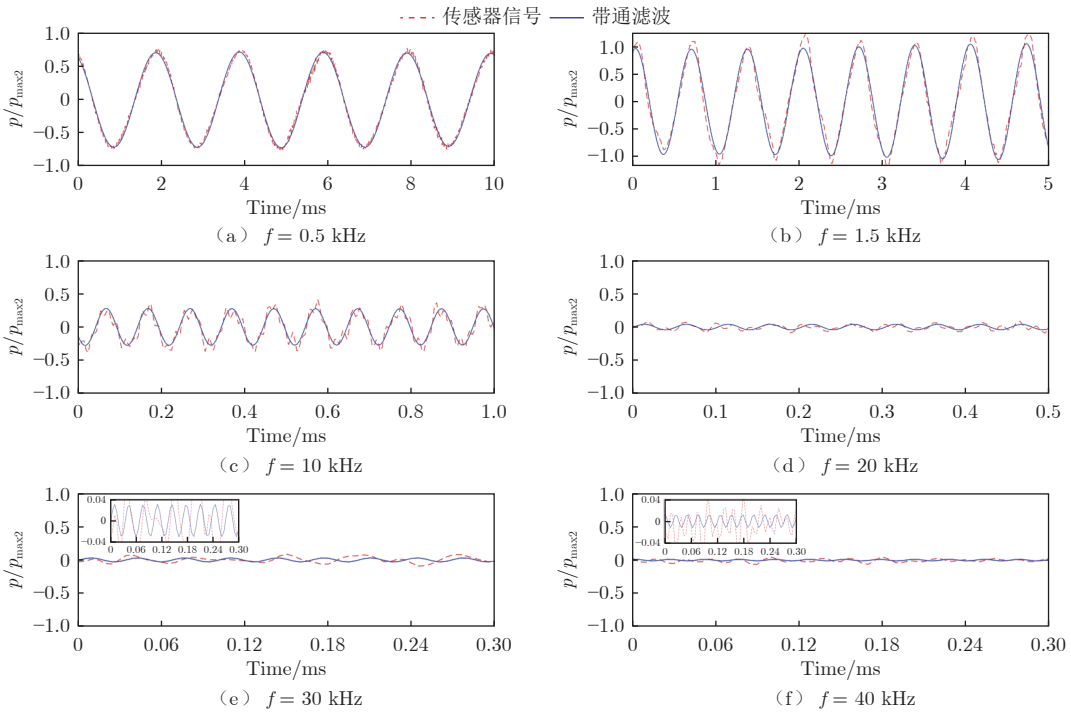


图 8 压力传感器原始信号及带通滤波结果

Fig. 8 Original signal and filtering result of pressure sensor

形成高阶波，使得驻波场变得十分复杂；二是高频时扬声器信号波形失真，管内产生多重谐波，形成多种频率的噪声。

图 10 为校准系统共振谱图。从图中可以看出：随着频率增大，驻波管内的动态压力波动幅值下降，这与从图 8 和 9 得到的结论吻合；在某些倍频下，出现了幅值突升现象，这与高丽敏等[18]在驻波管性能实验中发现的现象吻合，原因是驻波管与声源形成了耦合共振，提高了管内压力波动幅值。对图 10 中典型工作频率对应的压力值进行计算，得到校准系统压力–频率表（表 1），表中校准系统达到的最高压力幅值约为 5.20 kPa。考虑到 PSP 的实际压力分辨率，以压力幅值大于 100 Pa 时对应的工作频率作为校准系统有效工作频率上限，得到校准系统有效工作频率范围为 0.5～30 kHz，最佳工作频率范围为 0.5～10 kHz。

3.2 PC–PSP 压力灵敏度及温度影响

Liu 等[21]以 1 个标准大气压（101325 Pa）、25 ℃下的光强作为参考光强，得到了不同温度下 PSP 的校准曲线，该曲线耦合了压力灵敏度和温度敏感度的影响。Peng 等[22]则以 1 个标准大气压、当前温度（实验中测得的压敏漆样片表面温度）下的光强作为参考光强，得到了不同温度下的 PSP 校准曲线，从而排除了温度敏感度的影响，单独表征了 PSP 的压力灵敏度特性。

设不同温度下动态校准曲线中的参考压力 p_{ref} 为 1 个标准大气压（当地大气压为 96.521 kPa），参考光强 I_{ref} 为 1 个标准大气压、当前温度下的光强。对数据进行一阶拟合，在工作频率 0.5 和 3 kHz 下得到不同温度下的动态校准曲线，如图 11 所示。压力灵敏度 S_p 见表 2（$S_{p\text{-}0.5}$ 和 $S_{p\text{-}3}$ 分别为工作频率 0.5 和 3 kHz 下的压力灵敏度）。

从图 11 和表 2 可以看出，在 10～40 ℃区间内，光强与压力呈线性关系。频率为 0.5 kHz 时，不同温度下的校准曲线基本重合，表明低频时温度对压力灵敏度的影响较小；频率为 3 kHz 时，不同温度下的校准曲线不再重合，表明温度对压力灵敏度的影响增大。在 10 ℃下，当频率由 0.5 kHz 增大至 3 kHz 时，压力灵敏度下降了 22.8%；在 40 ℃下，当频率由 0.5 kHz 增大至 3 kHz 时，压力灵敏度下降了 10.3%。总体而言，在同一温度下，PC–PSP 压力灵敏度随频率增大而减小；随着温度升高，PC–PSP 压力灵敏度因频率增大而下降的幅度降低。频率变化对 PC–PSP 压力灵敏度存在显著影响；温度对 PC–PSP 压力灵敏度的影响虽不明显，但在测量中不可忽视 PSP 自身的温度敏感度。

3.3 PC–PSP 频响特性及温度影响

在 10 ℃下，工作频率 f 为 0.5、3.0 和 4.5 kHz

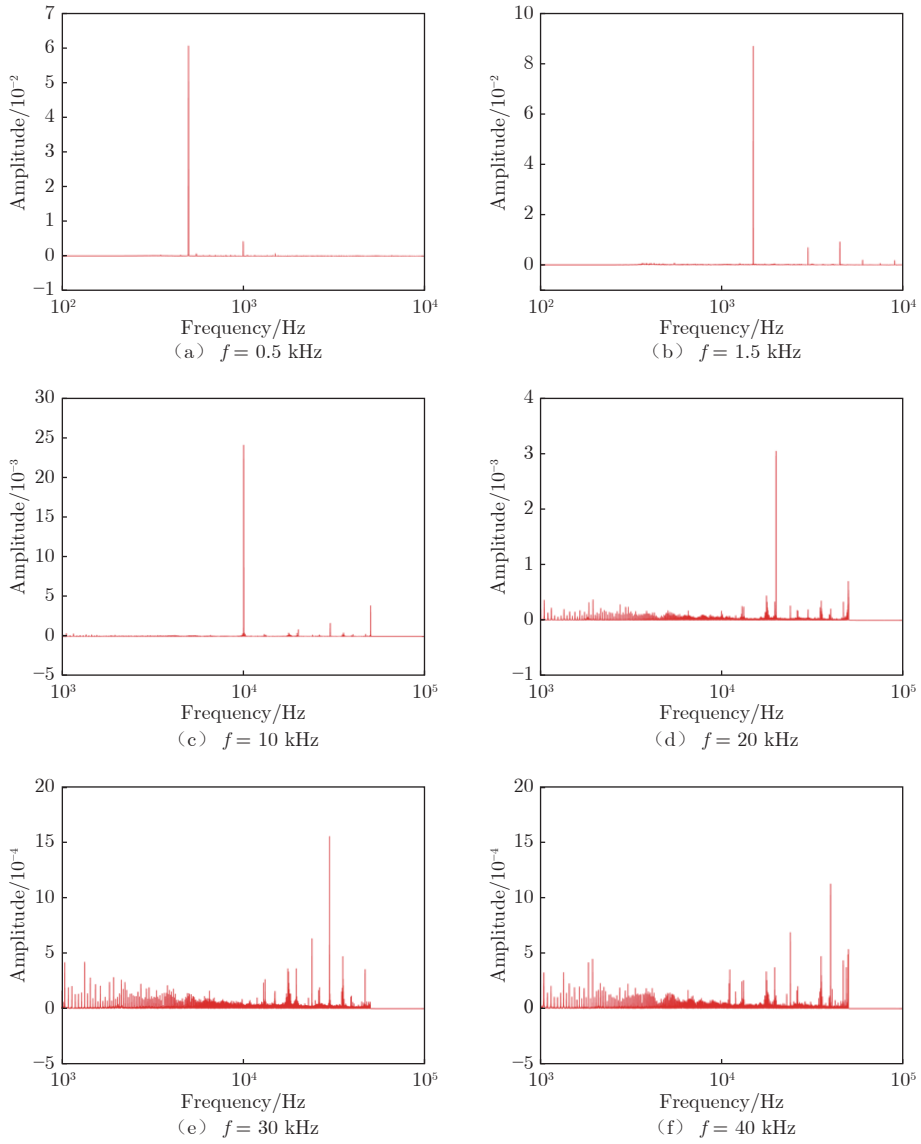


图 9　压力传感器原始信号频谱图

Fig. 9　Spectrogram of pressure sensor's original signal

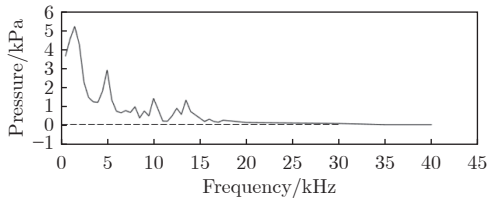


图 10　校准系统共振谱图

Fig. 10　Resonance spectrum of calibration system

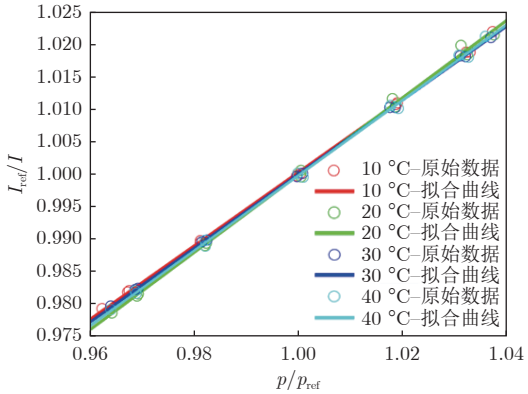
表 1　校准系统压力–频率表

Table 1　Pressure-frequency table of calibration system

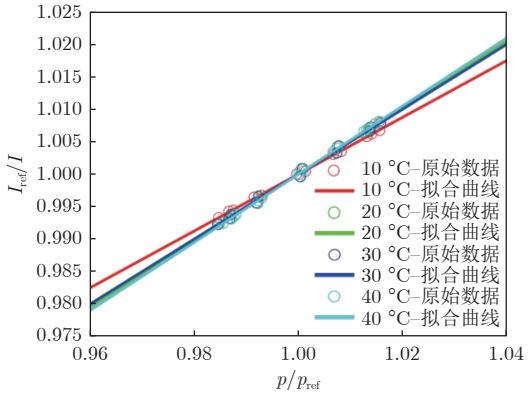
工作频率/kHz	压力/kPa	工作频率/kHz	压力/kPa
0.5	3.647	15	0.242
1.5	5.198	20	0.191
5	2.926	30	0.137
10	1.450	40	0.078

时 PC–PSP 样片的测量结果如图 12 所示。图中 I 为 PMT 测得的 PSP 光强值，p_{max3} 和 I_{max} 分别为 0.5 kHz 下动态压力传感器测得的压力值和 PMT 测得的光强峰峰值（PMT 通过电流采样后反向放大为电压输出）。可以看出，PMT 输出信号的波动周期与压力传感器信号吻合，且随着频率增大，PSP 光强峰峰值逐渐降低。在 4.5 kHz 下，PMT 测得的光强信号噪声较大，但 PSP 仍能正确表征动态压力变化。

图 13 为工作频率 f = 0.5、1.0、2.0、3.0、4.5 kHz 时，PC–PSP 样片在 10、20、30 和 40 ℃ 下的时域测量结果。图中 I_{max} 为 0.5 kHz、当前温度下 PMT 测得的光强峰峰值，当前频率和温度下的发光强度 I 与 I_{max} 的比值即为光强脉动比。在 10～40 ℃ 范围内，随着温度升高，最大光强脉动比逐渐增大。



（a） $f = 0.5$ kHz



（b） $f = 3$ kHz

图 11 PC–PSP 样片在不同温度下的动态校准曲线

Fig. 11 Dynamic temperature calibration curves of PC–PSP samples at different temperatures

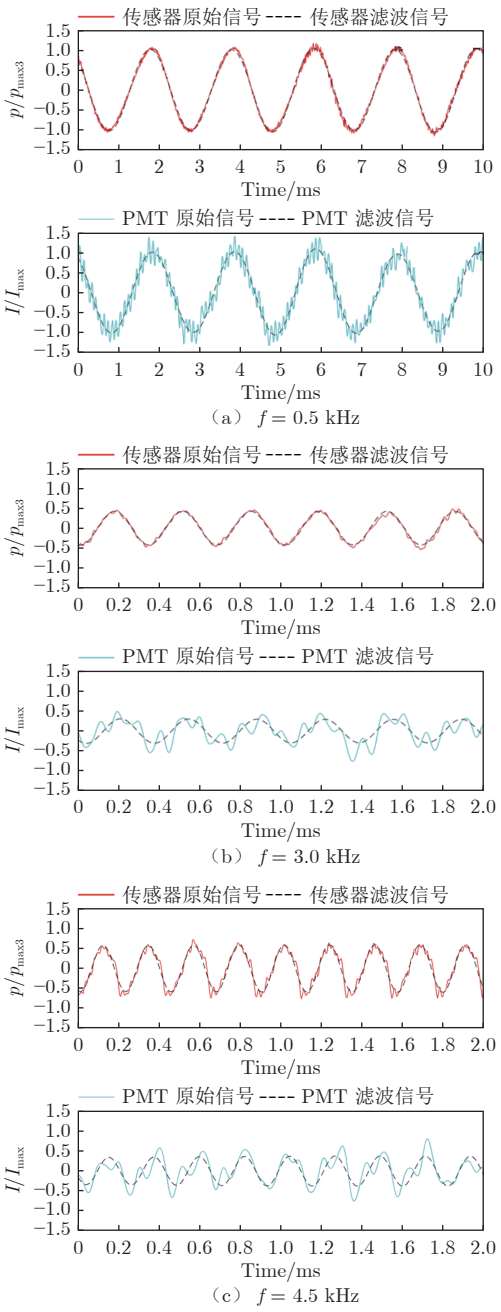
表 2 PC–PSP 样片变温压力灵敏度表

Table 2 Pressure sensitivity table of PC–PSP sample with changing temperature

温度/℃	$S_{p\text{-}0.5}/(\%\cdot\text{kPa}^{-1})$	$S_{p\text{-}3}/(\%\cdot\text{kPa}^{-1})$	$1-S_{p\text{-}3}/S_{p\text{-}0.5}$
10	0.57	0.44	22.8%
20	0.59	0.51	13.6%
30	0.57	0.50	12.3%
40	0.58	0.52	10.3%

应当注意到，随着工作频率增大，PMT 测得的光强信号相对于动态压力传感器测得的压力信号出现了相位滞后现象。图 14 给出了不同温度下的增益与相位滞后情况（二阶拟合）。图 14(a)表明，温度对 PC–PSP 的动态响应有较大影响：在同一温度下，增益随频率增大而减小；不同温度下，截止频率随温度升高而增大。样片温度为 10 ℃ 时，截止频率为 4.1 kHz；温度为 40 ℃ 时，截止频率为 6.0 kHz。参考动态压力传感器的计量标准，以 20 ℃ 下对应的截止频率 4.8 kHz 作为该快响应 PSP 的截止频率。

图 14(b)表明，与输入的动态压力信号相比，PC–PSP 的相位存在明显滞后：在同一温度下，相位随频率增大不断滞后；在同一频率下，随着温度升



（a） $f = 0.5$ kHz

（b） $f = 3.0$ kHz

（c） $f = 4.5$ kHz

图 12 PC–PSP 样片在 10 ℃ 下的测量结果

Fig. 12 Measurement results of PC–PSP sample at 10 ℃

高，相位滞后现象逐渐减弱。参考彭迪等[23-24]的研究，推测较高的温度能够有效增强 PC–PSP 中探针分子的活性，使得 PSP 发光寿命更短，响应更加迅速；同时，温度升高提升了 PSP 表面氧分子的运动速度，加快了氧分子扩散速率，从而有利于提高截止频率、改善相位滞后情况。

4 结 论

本文提出了快响应 PSP 动态校准方法，包括建立校准驻波场、获取动态校准曲线及相关参数。通过采

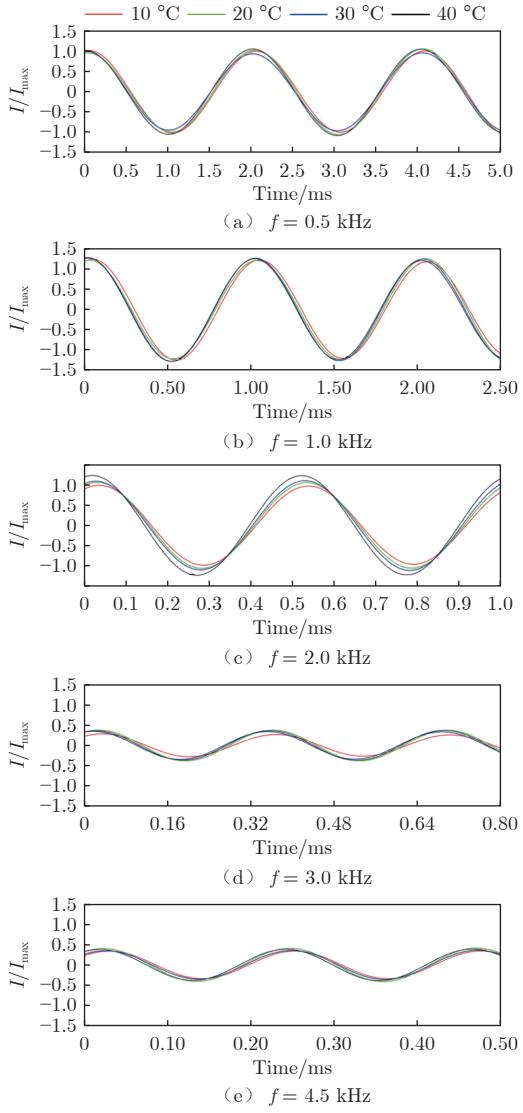


图 13　PC–PSP 样片在不同温度下的测量结果

Fig. 13　Measurement results of PC–PSP samples at different temperatures

用能够调节温度和频率的动态校准装置建立了可控的校准驻波场，系统开展了温度对所研制的 PC–PSP 压力灵敏度和频响特性的影响研究，得到以下结论：

1）所建立的校准驻波场最高压力幅值约为 5.20 kPa。理论计算和性能实测表明截止频率 f_c = 8.30 kHz，有效工作频率为 0.5～30 kHz，样片温度调节范围为 5～60 ℃，可以满足快响应 PSP 在指定温域内的动态校准要求。

2）动态校准比静态校准能够更准确地反映快响应 PSP 特性。频率对 PC–PSP 压力灵敏度的影响显著，温度对 PC–PSP 压力灵敏度的影响不明显，但测量中不可忽视 PC–PSP 自身的温度敏感度。在同一温度下，PC–PSP 压力灵敏度随频率增大而减小；随着温度升高，压力灵敏度因频率增大而下降的幅度降低。

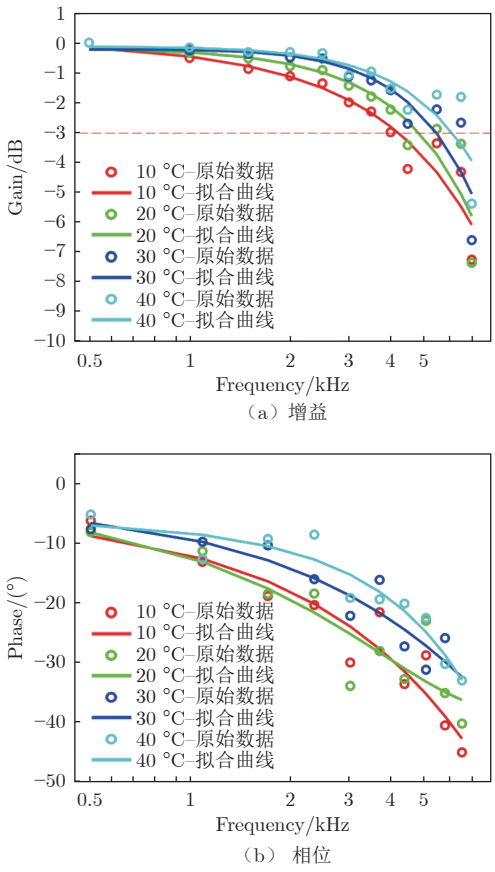


图 14　不同温度下 PC–PSP 样片的频响特性

Fig. 14　Frequency response characteristics of PC–PSP samples at different temperatures

3）温度对 PC–PSP 的动态响应有较大影响：在同一温度下，增益随频率增大而减小；在不同温度下，截止频率随温度升高而增大。与输入的动态压力信号相比，PC–PSP 的相位存在明显滞后：在同一温度下，相位随频率增大不断滞后；在同一频率下，随着温度升高，相位滞后现象逐渐减弱。

4）在 20 ℃、工作频率 0.5 kHz 下，测得某 PC–PSP 的动态压力灵敏度为 0.59%/kPa；在 20 ℃、工作频率 3.0 kHz 下，其动态压力灵敏度为 0.51%/kPa，截止频率为 4.8 kHz。该涂料性能稳定，能够满足低速风洞非定常试验的工程要求。

参考文献：

[1] PETERSON J I, FITZGERALD R V. New technique of surface flow visualization based on oxygen quenching of fluorescence[J]. Review of Scientific Instruments, 1980, 51(5): 670-671. doi: 10.1063/1.1136277

[2] 战培国. 动态压敏漆技术研究综述[J]. 飞航导弹, 2015(7): 55-59. doi: 10.16338/j.issn.1009-1319.2015.07.12

[3] GREGORY J W, SAKAUE H, LIU T S, et al. Fast pressure-sensitive paint for flow and acoustic diagnostics[J].

Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46: 303-330.
doi: 10.1146/annurev-fluid-010313-141304

[4] DONG Z, LIANG L, ZHANG W G, et al. Simultaneous pressure and deformation field measurement on helicopter rotor blades using a grid-pattern pressure-sensitive paint system[J]. Measurement, 2020, 152: 107359.
doi: 10.1016/j.measurement.2019.107359

[5] 魏春华, 仝帆, 廖先辉, 等. 基于快响应压敏漆的螺旋桨表面压力测量技术研究[J]. 气动研究与实验, 2022, 34(2): 53-60.
WEI C H, TONG F, LIAO X H, et al. Research on surface pressure measurement technology of propeller based on fast-sounding Pressure-Sensitive Paint[J]. Aerodynamic Research & Experiment, 2022, 34(2): 53-60.
doi: 10.12050/are20220206

[6] NAKAKITA K. Scanning unsteady PSP technique for high-frequency and small-pressure fluctuation in low-speed[C]// Proc of the 27th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. 2010.
doi: 10.2514/6.2010-4920

[7] CRAFTON J, FORLINES A, PALLUCONI S, et al. Investigation of transverse jet injections in a supersonic crossflow using fast-responding pressure-sensitive paint[J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(2): 1-15.
doi: 10.1007/s00348-014-1877-3

[8] GORDEYEV S, DE LUCCA N, JUMPER E J, et al. Comparison of unsteady pressure fields on turrets with different surface features using pressure-sensitive paint[J]. Experiments in Fluids, 2014, 55(1): 1661.
doi: 10.1007/s00348-013-1661-9

[9] DAVIS T, EDSTRAND A, ALVI F, et al. Investigation of impinging jet resonant modes using unsteady pressure-sensitive paint measurements[J]. Experiments in Fluids, 2015, 56(5): 101.
doi: 10.1007/s00348-015-1976-9

[10] PASTUHOFF M, TILLMARK N, ALFREDSSON P H. Dynamic calibration of polymer/ceramic pressure sensitive paint using a shock tube[C]//Proc of the 7th International Conference on Flow Dynamics. 2010: 132-133.

[11] KAMEDA M. Effect of luminescence lifetime on the frequency response of fast-response pressure-sensitive paints [J]. Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 2012, 78(795): 1942-1950.
doi: 10.1299/kikaib.78.1942

[12] GREGORY J W, ASAI K, KAMEDA M, et al. A review of pressure-sensitive paint for high-speed and unsteady aerodynamics[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2008, 222(2): 249-290.
doi: 10.1243/09544100jaero243

[13] PANDEY A, GREGORY J W. Frequency-response characteristics of polymer/ceramic pressure-sensitive paint[J]. AIAA Journal, 2016, 54(1): 174-185.
doi: 10.2514/1.J054166

[14] SUGIMOTO T, KITASHIMA S, NUMATA D, et al. Characterization of frequency response of pressure-sensitive paints[C]//Proc of the 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012.
doi: 10.2514/6.2012-1185

[15] CASPER K M, WAGNER J L, BERESH S J, et al. Unsteady pressure sensitive paint measurements of resonance properties in complex cavities[C]//Proc of the 46th AIAA Fluid Dynamics Conference. 2016.
doi: 10.2514/6.2016-3315

[16] McMULLEN R M, HUYNH D P, GREGORY J, et al. Dynamic calibrations for fast-response porous polymer/ceramic pressure-sensitive paint[C]//Proc of the AIAA Ground Testing Conference. 2013.
doi: 10.2514/6.2013-3123

[17] PANDEY A, GREGORY J. Dynamic response characteristics of polymer/ceramic pressure-sensitive paint[C]//Proc of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2015.
doi: 10.2514/6.2015-0021

[18] 高丽敏, 姜衡, 葛宁, 等. 正弦波型高频动态压力光学校准系统及其应用[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 123667.
GAO L M, JIANG H, GE N, et al. A high frequency dynamic pressure optical calibration system based on sinusoidal wave and its application[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 123667.
doi: 10.7527/S1000-6893.2020.23667

[19] 高丽敏, 欧阳波, 姜衡, 等. 快速响应压力敏感涂料截止频率实验研究[J]. 航空学报, 2023, 44(11): 38-46.
GAO L M, OUYANG B, JIANG H, et al. Experimental study on cut-off frequency of fast response pressure sensitive paint[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(11): 38-46.
doi: 10.7527/S1000-6893.2022.27556

[20] SUGIMOTO T, SUGIOKA Y, NUMATA D, et al. Characterization of frequency response of pressure-sensitive paints[J]. AIAA Journal, 2017, 55(4): 1460-1464.
doi: 10.2514/1.j054985

[21] LIU T S, SULLIVAN J P, ASAI K, et al. Pressure and temperature sensitive paints[M]. Berlin: Springer, 2005: 30-31.

[22] PENG D, GU F, ZHONG Z, et al. Thermal stability improvement of sprayable fast-responding pressure-sensitive paint for measurement above 100 ℃[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(1): 320-326.
doi: 10.1016/j.cja.2020.09.040

[23] PENG D, LIU Y Z. Fast pressure-sensitive paint for understanding complex flows: from regular to harsh environments[J]. Experiments in Fluids, 2019, 61(1): 8.
doi: 10.1007/s00348-019-2839-6

[24] JIAO L R, PENG D, LIU Y Z. Dynamic response of polymer ceramic pressure-sensitive paint: improved model considering thickness effect[J]. AIAA Journal, 2018, 56(7): 2903-2906.
doi: 10.2514/1.J056778



作者简介:

刘 强(1997—),男,四川泸州人,硕士研究生。研究方向:快响应压敏漆静、动态校准技术。

E-mail: liuzeal@foxmail.com

(编辑:秦虹)