

# 基于图像信噪比的 PSP 图像平均幅数确定方法

黄 辉, 熊 健, 刘 祥, 王红彪

(中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 压敏漆测压技术具有非接触、全域测量的优点, 广泛应用于模型表面压力分布测量; 压敏漆试验中采用连续采集多幅图像求平均的方式降低图像噪声, 一般根据经验确定图像采集幅数; 对 CCD 相机的噪声类型进行分析, 判断 PSP 测量系统随机噪声的主要来源为 CCD 光散粒噪声; 提出了一种基于划分子区域的比图像信噪比计算方法, 对比分析了某翼型和三角翼模型 PSP 试验数据不同图像平均幅数的处理结果, 结果表明图像平均幅数增加到一定值后信噪比会趋于收敛, 图像平均幅数减半后依然可以满足 PSP 测压试验精度要求, 可通过分析信噪比确定每个工况采集的图像幅数, 进而达到合理控制风洞试验时间的目的。

**关键词:** 压敏漆; 电荷耦合器件; 随机噪声; 信噪比; 图像平均幅数

## PSP Image Average Number Determination Method Based on Image Signal-to-Noise Ratio

HUANG Hui, XIONG Jian, LIU Xiang, WANG Hongbiao

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Pressure sensitive paint measurement technology has the advantages of non-contact, full range measurement, it is widely used in the distribution measurement of model surface pressure. In pressure sensitive paint test, the continuous acquisition of multiple images and calculating the average image are used to reduce the noise, the number of the images is generally determined by experience. Scientific CCD camera's noise type is analyzed to judge that the main noise source of the pressure sensitive paint (PSP) measurement system is the CCD's optical scattering noise. A calculation method of image signal-to-noise ratio based on sub region is proposed, and the results of different average number of PSP test images of airfoil and delta wing model are compared and analyzed. The results show that the signal-to-noise ratio tends to converge when the average number of images is increased to a certain value, and the result can still meet the accuracy requirements of the PSP pressure test when the average number is halved. The required number of images could be determined by analyzing the signal-to-noise, which achieves the goal of reasonable control of wind tunnel test time.

**Keywords:** pressure sensitive paint; charge coupled devices; random noise; signal-to-noise ratio; average number of images

## 0 引言

模型压力分布测量是研究飞行器气动特性、获得飞行器气动载荷的重要手段。压力分布试验的目的是在不改变飞行器模型表面流态的前提下, 实现模型表面的压力分布测量, 进而了解气流绕模型的流动特性, 确定模型所受法向力、压差阻力、压力中心位置, 为飞行器结构强度设计提供载荷数据。传统压力分布试验需要在模型表面开测压孔, 布置气路, 使用压力传感器对测压孔所处位置的压力进行测量。该方法虽然测量精度高, 但数据结果为离散数据点, 使用时往往需要对压力场进行重构, 可能出现部分插值数据精度不高的问题。同时测压模型设计复杂、加工成本高, 且不适用于无法布置测压孔的扁平部件。压力敏感涂料 (PSP, pressure sensitive paint) 测量技术作为一种新型的非接触式光学压力测量方法<sup>[1]</sup>, 具有非接触、全域测量的优势, 经过在线标定后, 精度可接近传统压力传感

器精度, 较传统测压孔方法可有效缩短模型加工时间, 降低模型加工成本。PSP 测量技术以其巨大的发展潜力及技术优势, 被国内外研究机构广泛关注并深入研究<sup>[2-10]</sup>。目前美国、俄罗斯、欧洲和日本等国的航空航天部门已经建立了成熟的 PSP 测量技术, 并获得广泛应用。国内 PSP 测量技术起步于 20 世纪 90 年代, 经过中空气动力研究院、航空气动力技术研究院、上海交大、西北工业大学、中国空气动力研究与发展中心等科研机构的大力发展, PSP 技术已在风洞试验<sup>[11-13]</sup>、发动机内流<sup>[14-15]</sup>、微流场测量<sup>[16]</sup>、气膜冷却<sup>[17-18]</sup>等领域得到了广泛应用, 应用对象包括翼型、短舱、发动机叶片、直升机旋翼等飞行器模型或部件。

PSP 试验过程中需要采集背景图像、无风图像和有风图像, 一般采用连续采集多幅图像求平均的方式降低随机噪声, 达到提高数据精度的目的。从消除图像随机噪声的角度, 图像平均幅数需要尽量多, 但是在风洞试验的工程应用中, 图像平均幅数的增多意味着试验时间和 PSP 温度

收稿日期: 2023-05-07; 修回日期: 2023-06-21。

作者简介: 黄 辉(1985-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 黄 辉, 熊 健, 刘 祥, 等. 基于图像信噪比的 PSP 图像平均幅数确定方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 237-243.

效应的增加，最终影响到试验效率、成本和数据精度。在中国空气动力研究与发展中心 2.4 m 暂冲式跨超声速风洞开展的 PSP 试验中，图像平均幅数一般根据经验设置，每个工况常采集 20 幅以上，在 PSP 测量系统参数及压敏漆涂料相同的情况下，试验时间与图像平均幅数成正比，因此缩短试验时间最直接的方法是减少图像平均幅数。

图像信噪比作为评价图像质量的主要指标，可用于定量评价电荷耦合器件 (CCD, charge coupled devices) 成像系统图像质量<sup>[19-21]</sup>，并且在遥感图像噪声估计中得到了广泛的应用<sup>[22-24]</sup>。PSP 测量系统的核心设备为 CCD 相机，通过分析其主要噪声来源和图像平均幅数与信噪比的关系，可用于指导确定图像采集幅数这一影响风洞运行时间的关键参数，同时结合前期开展的宽体客机与三角翼 PSP 试验数据，对不同图像平均幅数计算得到的压力系数进行对比研究。

### 1 PSP 测压原理

PSP 测量物体表面压力基于光致发光和氧猝灭原理。压敏漆涂层由面漆和底漆两部分组成，喷涂时先将底漆喷涂于模型表面，待底漆固化后再将面漆喷涂于底漆表面。面漆是含压敏探针分子的工作层，探针分子为高分子聚合物，面漆涂层为尺寸均匀的颗粒组成的多孔性固体薄膜，具有一定的厚度、浓度、均匀性和透气性；基底反射层，通常为含二氧化硅的白色底漆，作用是增强探针分子发光强度，提高涂层的黏结性。压敏漆工作原理如图 1 所示，探针分子受到特定波长范围的光激发后，会从基态跃迁到激发态，之后受激发的探针分子可以通过辐射和无辐射两个过程回到基态。其中辐射过程称为光致发光，即激发态探针分子通过发出荧光释放能量的形式回到基态；无辐射过程中，激发态探针分子在发出荧光前与基态氧分子碰撞，发生能量转移，基态氧分子获得能量形成激发态氧分子，激发态探针分子回到基态，这就是发光的氧猝灭。由亨利定律可知，PSP 涂料中的氧浓度与当地氧分压成正比，即

气体压力越高，PSP 中氧分子越多，探针分子被淬灭的效率也越高，因此 PSP 发光强度与气体压力成反比。发光强度和氧浓度之间的关系可用 Stern-Volmer 关系来描述<sup>[25]</sup>，如式 (1) 所示，其中  $A(T)$ ， $B(T)$  为 Stern-Volmer 常数，与温度相关，通过校准得到，为压力在下的光强。

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

常规单组份 PSP 在工程应用中由于温度效导致压力测量误差较大，目前普遍使用的是双组份压敏涂料，该涂料包括压敏组份探针和参考组份探针，参考组份探针对压力不敏感，激发光谱与压敏探针相似且发射光谱可分离，且与压敏探针的温度灵敏度基本一致。结合双组份压敏漆数据处理方法，可降低压敏涂料的温度灵敏度并消除模型位移或变形后激发照射强度变化引起的测量误差。双组份 PSP 的校准公式见式 (2)， $I_{\lambda 1}$  与  $I_{\lambda 2}$  为压敏组份和参考组份在有风条件下的发光强度， $I_{\lambda 1ref}$  与  $I_{\lambda 2ref}$  为压敏组份和参考组份在无风参考条件下的发光强度， $P$  为有风压力， $P_{ref}$  为无风压力<sup>[26]</sup>。

$$\frac{I_{\lambda 1ref}/I_{\lambda 2ref}}{I_{\lambda 1}/I_{\lambda 2}} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{ref}} \quad (2)$$

### 2 PSP 测量系统

中国空气动力研究与发展中心高速所在 2.4 m 跨声速风洞建立了基于双组份压敏漆、多光源和多 CCD 的 PSP 测量系统<sup>[13]</sup>，成功解决了大型暂冲式跨超声速风洞试验存在的模型表面温度变化、光照均匀性与强度变化，以及模型振动、试验数据修正、喷涂与涂料校准等诸多影响 PSP 测量结果精准度与可靠性的问题，并成功应用于各类模型的表面压力分布测量试验。该系统由双组份压敏漆、光学测量系统、静态校准系统、同步控制系统和图像后处理软件组成。

双组份压敏漆激发与发射光谱如图 2 所示，由中科院化学所提供，该涂料工作温度为 0~50 °C，压力敏感度为 0.7%/kPa，激发光波长为 380~420 nm，发射光波长为 500~720 nm。

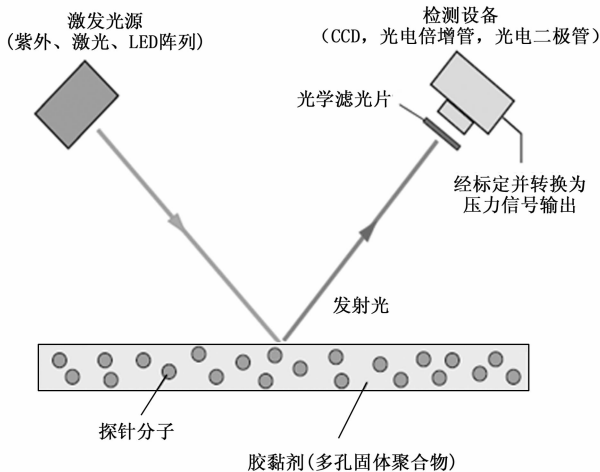


图 1 压敏漆工作原理图

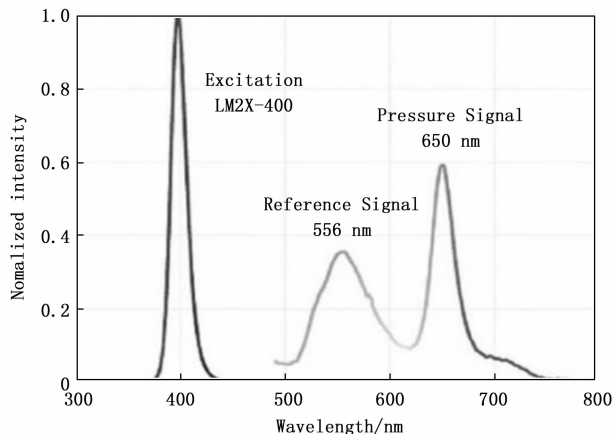


图 2 FIB 双组份涂料吸收光谱与发射光谱曲线

光学测量系统由 PCO 1600 彩色相机及相机控制器、可变焦镜头及镜头控制器、400 nm LED 光源、稳压电源等组成。PCO 1600 彩色相机是带背板制冷的科学级 CCD 相机, 位深 14 位, 分辨率  $1\,600 \times 1\,200$ , 变焦镜头可通过镜头控制器进行远程控制。激发光源为阵列式 LED 光源, 该光源具有连续和脉冲两种工作模式, 输出功率 12 W, 发光主峰 400 nm, 脉冲模式下上升稳定时间小于  $5\ \mu\text{s}$ 。

校准系统由计算机、压力控制器、温度控制器、密封腔体、PCO 1600 相机和 LED 激发光源组成。校准时, 将校准样片放置于密封腔体内, 该腔体可通过软件分别控制压力 ( $5 \sim 200\ \text{kPa}$ ) 和温度 ( $0 \sim 60\ ^\circ\text{C}$ )。校准步骤: 首先设定一组覆盖 PSP 工作范围的温度和压力点, 温度和压力点间隔一般为  $10\ \text{kPa}$  和  $5\ ^\circ\text{C}$ , 也可根据需求对校准点加密; 然后控制腔体温度和压力到设置点, 以温度为外循环, 压力为内循环, 完成所有温度和压力点的图像采集; 最后, 选择图像中温度相对均匀区域计算平均发光强度, 根据式 (2) 得到光强比值与压力的关系, 参考点一般选为常温常压条件。根据校准曲线可计算压力敏感度和温度敏感度, 光降解度试验也可在校准系统中进行<sup>[27]</sup>。

PSP 数据处理流程如图 3 所示, 包括数据预处理和修正、图像配准和滤波、压力计算、自照射修正、三维映射和网格积分<sup>[28]</sup>。数据处理软件输出为 PSP 压力或压力系数分布图像, 积分后的力和力矩等。

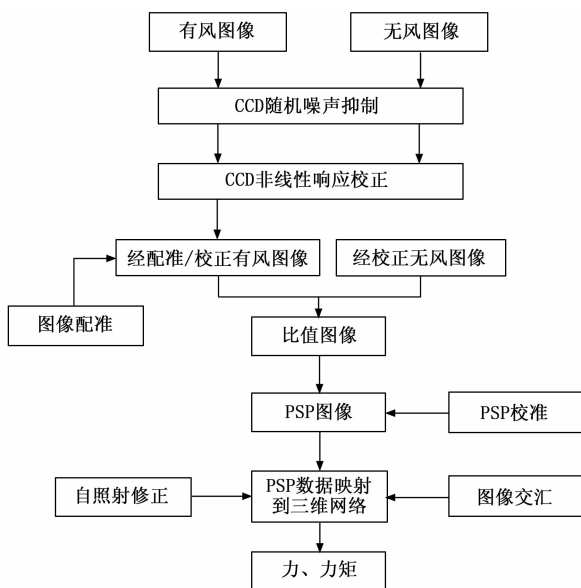


图 3 PSP 数据处理流程图

### 3 PSP 图像信噪比分析

PSP 数据处理中图像平均处理的主要目的是降低 PSP 测量系统随机误差, 主要包括 CCD 噪声、LED 光源光强抖动和设备震动引入的误差, 可通过使用高稳定性光源和采取减震措施对后者进行抑制, 因此系统随机误差的主要来源是 CCD 噪声。下面对 CCD 噪声类型进行分析与讨论, 对

比了 CCD 图像信噪比评估方法, 并给出一种适用于 PSP 图像信噪比计算和评估的方法。

#### 3.1 CCD 噪声类型分析

CCD 噪声包括随机噪声和模式噪声两大类。随机噪声随时间变化且服从某种统计分布, 主要包括由光子固有属性引起的光散粒噪声、电荷转移过程中引入的转移噪声、热激发在硅衬底产生的暗电流噪声。模式噪声是与空间分布有关的噪声, 主要表现为固定模式噪声。研究表明随机噪声为 CCD 的主要噪声来源, 固定模式噪声在 CCD 相机噪声组成中所占份额不大于  $1\%$ <sup>[29]</sup>。

PSP 测量系统中的光检测设备 PCO 1600 为科学级 CCD, 带背板制冷功能, 长时间工作依然可以保持感光元件在低于环境温度  $50\ ^\circ\text{C}$  的低温状态工作, 可显著降低暗电流噪声, 且该 CCD 相机采用双采样技术, 可有效降低 CCD 电荷转移过程中产生的转移噪声<sup>[30]</sup>。因此该 CCD 随机噪声中的主要成分为光散粒噪声, 服从泊松分布<sup>[29]</sup>, 可通过图像平均及后续的二维图像滤波进行有效抑制。从提高试验数据精度的角度考虑, 需要提高图像平均幅数, 达到更好的噪声抑制效果, 然而图像采集幅数与试验时间正相关, 需要根据噪声抑制效果与试验效率权衡, 合理确定满足噪声抑制需求的图像平均幅数。

#### 3.2 CCD 图像信噪比评估方法

CCD 图像信噪比评估主要有三类方法: 实验室法、暗电流法和图像法<sup>[31]</sup>。实验室法通过拍摄一个均匀亮度的目标, 计算目标区域光强的均值和标准差, 两者比值作为图像信噪比。暗电流法需要通过专用设备分析 CCD 暗电流, 对图像噪声进行估计。实验室法和暗电流法都需要专门的试验环境和设备, 不适用于大部分工程应用环境。图像法应用图像处理算法和统计学方法, 直接对图像的噪声和信号进行评估, 适用性更为广泛, 主要分为方差法、滤波法和局部方差法<sup>[32]</sup>。

方差法<sup>[33]</sup>计算过程与实验室法一致, 需要手动选择一个大面积且光强均匀分布的区域, 该区域均值和标准差的比值即为信噪比。该方法的缺点是非自动, 且实际图像中往往不存在大面积的均匀区域, 若选择的均匀区域较小则计算结果无法代表图像整体噪声水平。滤波法<sup>[34]</sup>利用滤波算法对图像噪声进行估计, 首先使用滤波算法对图像进行降噪处理, 再用原图像减去滤波后图像, 得到噪声分布图像, 最后计算原图像与噪声图像平均值之比作为信噪比。该方法的缺点是对于不同强度的噪声退化图像, 滤波器类型和参数的选取对噪声估计结果影响较大。局部方差法<sup>[35]</sup>是对方差法的一种改进, 主要解决图像缺少大面积均匀区域的问题, 需要将图像分为许多均匀的小块, 统计所有小块的标准差, 计算得到反映整幅图像噪声水平的信噪比。该方法对原始图像无特殊要求, 可对图像整体噪声进行估计, 结合图像边缘检测和图形分割算法可实现自动化, 难点是针对不同类型图像, 需要匹配相应的图像处理算法。

### 3.3 PSP 图像信噪比计算方法

风洞试验时，试验模型表面存在激波、分离和再附等复杂的流动现象，导致模型表面存在压力阶跃和压力不均匀的现象，反映在 PSP 图像上就是具有显著的区域边界和压力梯度。综合考虑 PSP 测量系统噪声和 PSP 图像的特点，选用局部方差法作为评估 PSP 图像信噪比的方法。在选择评估对象方面，由于激发光源光照、压敏漆厚度及探针分子浓度不均匀，无法直接使用双组份压敏漆参考组份或者压敏组份图像进行信噪比计算，采用参考组份与压敏组份图像分别在有风和无风状态下的比图像可以避免上述因素的影响。具体计算流程如图 4 所示，数据处理流程主要包括 PSP 图像预处理和比值图像计算、模型区域图像分割、比值图像信噪比计算等步骤。

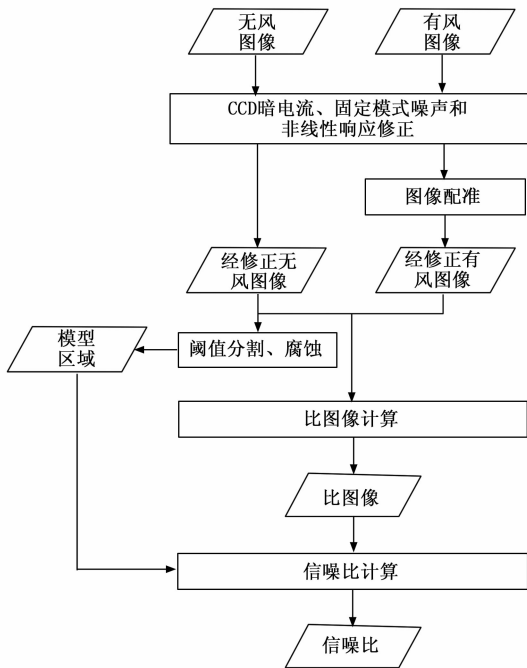


图 4 信噪比计算流程

1) PSP 图像预处理及比值图像计算：首先对有风图像和无风图像的每幅图像进行暗电流、固定模式噪声和非线性响应修正；然后针对试验中模型受力存在变形的情况，通过仿射变换将有风图像配准到无风图像，仿射变换矩阵通过定位有风及无风状态下模型表面标记点，并进行点配对的方式得到；最后计算不同图像平均幅数下的有风图像与无风图像的比值图像。

2) 模型区域图像分割：选择修正后的无风图像中的任意一幅图像，使用图像阈值分割算法将模型的 PSP 区域从图像中分割出来；然后对分割结果进行腐蚀处理，去除测量误差较大且变化剧烈的模型边缘区域，处理完成后得到用于计算信噪比的模型区域。

3) 比值图像信噪比计算：通过基于区域的图像分割算法对比值图像的模型区域进行分割，得到相对均匀的子区

域；然后对所有子区域进行腐蚀处理，去除边界剧烈变化区域，将各子区域划分为  $6 \times 6$  的子块，子块不含边界区域；最后通过对所有子块的标准差进行统计，得到综合反应比值图像全局质量的信噪比。信噪比具体计算过程：计算各子块局部标准差  $\delta_i$  及均值  $M_i$ ；然后按  $\delta_i$  最小值与平均值的 1.5 倍之间划分若干个区间进行直方图统计，找到直方图峰值处所对应的区间；最后，计算峰值区间方差的均值  $\overline{\delta_p}$ ，峰值区间平均值的均值  $\overline{M_{ip}}$ ， $\overline{M_{ip}}$  与  $\overline{\delta_p}$  的比值作为信噪比 SNR。

$$SNR = \frac{\overline{M_{ip}}}{\overline{\delta_p}} \quad (3)$$

### 4 试验结果分析

根据上述基于局部方差法的信噪比计算方法，分析 2.4 m 暂冲式跨超声速风洞前期开展的某翼型和三角翼模型 PSP 试验数据，得到图像信噪比与图像平均幅数的关系。如图 5 和图 6 所示，图像平均幅数上升到某一区间后，信噪比趋于收敛，图像平均幅数减少到原有图像平均幅数一半的情况下依然可以保证较高的信噪比，因此可通过分析信噪比确定每个工况采集的图像幅数，进而达到合理控制风洞试验时间的目的。参考组份图像相对压敏组份图像信噪比低，主要原因是参考组份图像的光强只有压敏组份图像光强的一半左右。

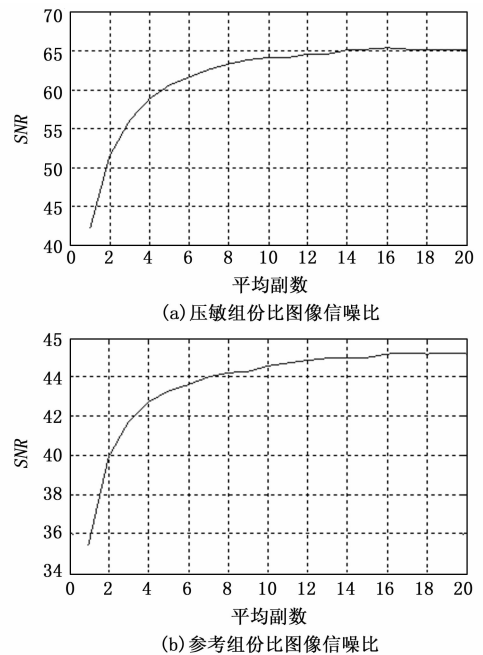
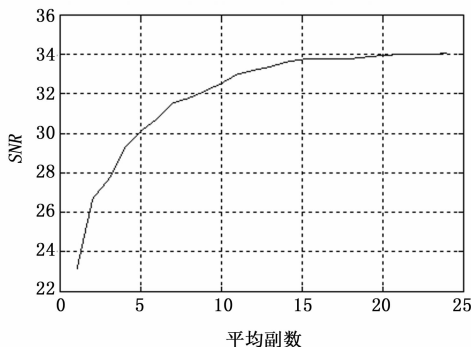
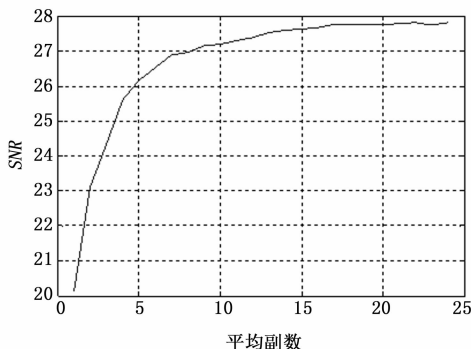


图 5 信噪比与图像平均幅数关系 (某翼型)

对某翼型及三角翼模型试验数据使用不同图像平均幅数进行处理，其它二维图像处理参数保持一致。计算不同图像平均幅数处理结果在同一截面的压力系数 ( $C_p$ ) 差值的均方根  $\overline{\Delta C_p}$ 、 $\overline{\Delta C_{pm}}$  为  $C_p$  数据差值绝对值的最大值，两个参数可用于衡量处理结果的差异。计算公式见式 (4) 和式 (5)：



(a) 压敏组份比图像信噪比



(b) 参考组份比图像信噪比

图 6 信噪比与图像平均幅数关系 (三角翼)

$$\overline{\Delta C_p} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\Delta C_{pi}|^2}{N}} \quad (4)$$

$$\Delta C_{pm} = \max(|\Delta C_{pi}|) \quad (5)$$

4.1 某翼型模型数据对比

某翼型试验每个试验状态采集 20 幅图像, 同一车次采用不同图像平均幅数处理结果与 20 幅图像的对比如表 1 所示, 可看出随图像平均幅数的增加,  $\overline{\Delta C_p}$  与  $\Delta C_{pm}$  逐渐减小, 10 幅与 15 幅统计结果差距较小, 与图 5 信噪比趋于收敛的结果一致。对比采用 10 幅图像与采用全部 20 幅图像的结果在模型不同截面的数据, 各截面  $C_p$  差值的统计结果如表 2 所示, 各车次不同截面的  $\overline{\Delta C_p}$  在 0.010 附近,  $\Delta C_{pm}$  最大到 0.029 7, 结合图 7 和图 8 可知, 差值较大的数据点均在模型边缘区域, 图 8 横轴为各像素点的相对弦长位置。马赫数 0.85, 攻角从  $2^\circ$  增加到  $3^\circ$  时,  $\overline{\Delta C_p}$  与  $\Delta C_{pm}$  有变大的趋势, 原因是模型在角度增大时有模型振动加剧的现象, 模型表面压力随模型振动会产生波动, 造成不同时间采集到的图像存在差异。

表 1 某翼型不同图像平均幅数压力系数对比

| 图像平均幅数 | 截面 200                  |                 | 截面 400                  |                 | 截面 600                  |                 |
|--------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|        | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ |
| 5      | 0.010 1                 | 0.019 1         | 0.011 4                 | 0.022 9         | 0.008 1                 | 0.017 1         |
| 10     | 0.006 4                 | 0.012 2         | 0.005 8                 | 0.014 3         | 0.004 7                 | 0.009 0         |
| 15     | 0.004 5                 | 0.009 2         | 0.003 8                 | 0.010 1         | 0.003 9                 | 0.007 8         |

表 2 某翼型各截面压力系数对比统计表

| M    | 攻角  | 截面 200                  |                 | 截面 400                  |                 | 截面 600                  |                 |
|------|-----|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|      |     | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ |
| 0.85 | 2.0 | 0.006 4                 | 0.012 2         | 0.005 8                 | 0.014 3         | 0.004 7                 | 0.009 0         |
| 0.85 | 2.5 | 0.013 9                 | 0.027 1         | 0.011 4                 | 0.019 8         | 0.010 5                 | 0.018 1         |
| 0.85 | 3.0 | 0.010 0                 | 0.024 8         | 0.010 8                 | 0.029 3         | 0.008 6                 | 0.025 7         |
| 0.70 | 2.5 | 0.015 1                 | 0.025 8         | 0.010 2                 | 0.022 8         | 0.013 5                 | 0.029 7         |



图 7 某翼型模型比图像

4.2 三角翼模型数据对比

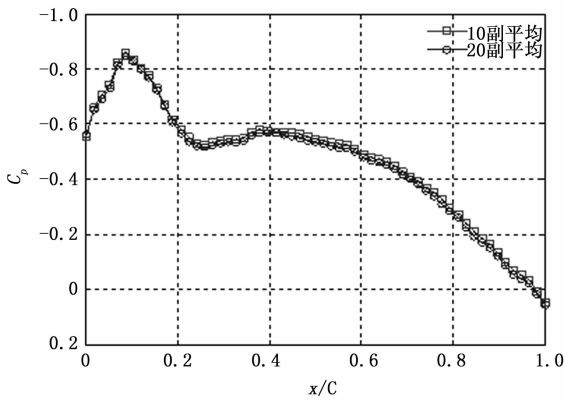
三角翼模型每个试验状态采集 24 幅图像, 同一车次采用不同图像平均幅数处理结果与 24 幅图像的对比如表 3 所示, 可看出随图像平均幅数的增加,  $\overline{\Delta C_p}$  与  $\Delta C_{pm}$  逐渐减小, 12 幅与 18 幅统计结果差距较小, 与图 6 信噪比趋于收敛的结果一致, 规律与某翼型模型结果一致。对比采用 12 幅图像与采用全部 24 幅图像的结果在模型不同截面的数据, 各截面  $C_p$  差值的统计结果如表 4 所示, 各车次不同截面的  $\overline{\Delta C_p}$  在 0.01 左右,  $\Delta C_{pm}$  最大达到 0.043, 结合图 9 和图 10 可知, 差值较大的数据点集中在模型中部区域及模型边缘区域, 图 10 横轴为各像素点的相对展长位置。马赫数 0.6

表 3 不同图像平均幅数压力系数对比统计表

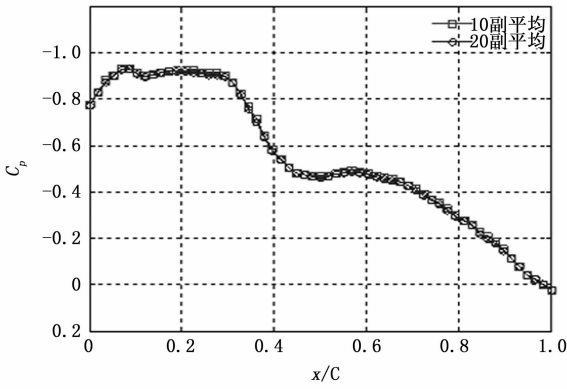
| 图像平均幅数 | 截面 150                  |                 | 截面 300                  |                 | 截面 450                  |                 |
|--------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|        | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ |
| 6      | 0.011 8                 | 0.027 4         | 0.013 0                 | 0.039 4         | 0.013 1                 | 0.031 2         |
| 12     | 0.007 0                 | 0.021 8         | 0.007 1                 | 0.020 5         | 0.008 7                 | 0.026 8         |
| 18     | 0.006 3                 | 0.018 5         | 0.006 5                 | 0.018 6         | 0.007 2                 | 0.025 4         |

表 4 三角翼各截面压力系数对比统计表

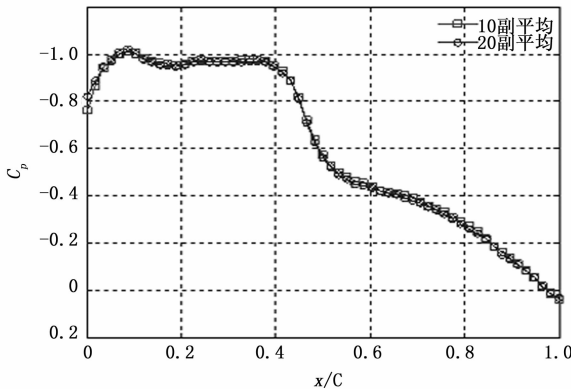
| M    | 攻角 | 截面 150                  |                 | 截面 300                  |                 | 截面 450                  |                 |
|------|----|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|      |    | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ | $\overline{\Delta C_p}$ | $\Delta C_{pm}$ |
| 0.60 | 0  | 0.012 2                 | 0.023 7         | 0.008 9                 | 0.023 8         | 0.011 2                 | 0.031 5         |
| 0.60 | 4  | 0.011 2                 | 0.027 9         | 0.014 0                 | 0.043 0         | 0.014 6                 | 0.042 1         |
| 0.60 | 8  | 0.014 7                 | 0.026 9         | 0.012 9                 | 0.036 3         | 0.010 8                 | 0.031 5         |
| 0.82 | 4  | 0.007 0                 | 0.021 8         | 0.007 1                 | 0.020 5         | 0.008 7                 | 0.026 8         |
| 1.20 | 4  | 0.004 4                 | 0.009 2         | 0.003 3                 | 0.010 5         | 0.003 3                 | 0.011 5         |



(a)  $\alpha = 2.0^\circ$



(b)  $\alpha = 2.55^\circ$



(c)  $\alpha = 3.0^\circ$

图 8 某翼型模型  $C_p$  对比 ( $M=0.85$  截面 400)

时, 攻角  $0^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $8^\circ$  的数据并无明显差异, 主要原因是三角翼模型支杆较粗, 马赫数低, 并未出现明显的振动。马赫数 0.82、1.2 时,  $\overline{\Delta C_p}$  和  $\Delta C_{pm}$  相对马赫数 0.6 有不同程度的改善,  $\overline{\Delta C_p}$  在 0.01 以内。

### 5 结束语

针对 PSP 测量系统 CCD 相机噪声和 PSP 图像的特点, 提出了一种基于图像局部分方差法的图像信噪比计算方法, 用于评估 PSP 图像信噪比, 根据信噪比与图像平均幅数关系, 可确定图像平均幅数这一影响风洞运行时间的关键参

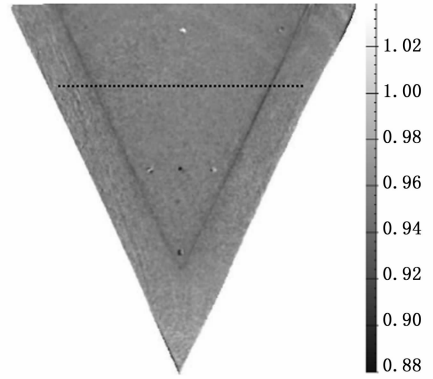
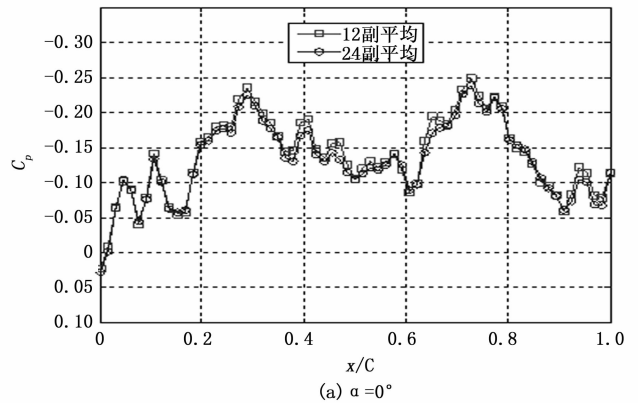
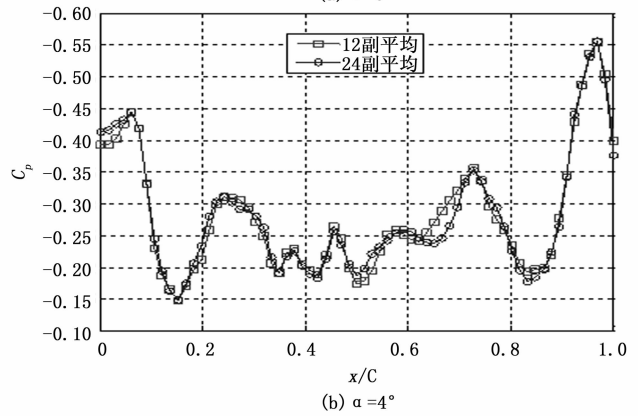


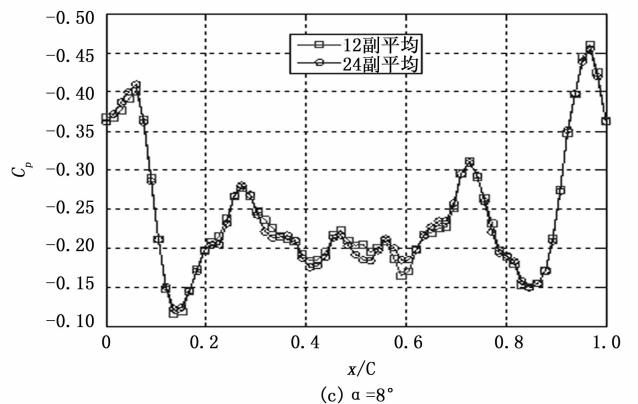
图 9 三角翼模型比图像



(a)  $\alpha = 0^\circ$



(b)  $\alpha = 4^\circ$



(c)  $\alpha = 8^\circ$

图 10 三角翼模型  $C_p$  对比 ( $M=0.60$  截面 300)

数。对比分析了两期 PSP 试验数据, 发现图像平均幅数减半后信噪比下降较少, 且测压结果满足 PSP 测压试验重复性精度需求。基于上述结果, PSP 试验首次车可以采集二十到三十幅的图像, 然后根据图像信噪比与图像平均幅数的关系确定后续车次的图像采集幅数。后续可通过增大 LED 光源功率和使用大尺寸像元 CCD 相机提高图像信噪比和缩短相机曝光时间, 达到提高 PSP 测压试验精度和缩短试验时间的目的。

#### 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] ENGLER R H, KLEIN C. DLR PSP system intensity and lifetime measurements [J]. Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, 1997, 29 (2): 46-56.
- [3] KONTIS K. A review of some current research on pressure sensitive paint and thermographic phosphor techniques [J]. The Aeronautical Journal, 2007, 7 (1): 495-508.
- [4] MARK E K, CHRISTOPHER A K, JOHN F D, et al. Recent improvements in pressure-sensitive paint measurement accuracy at boeing [C] //AIAA, 2002.
- [5] GARY E E, HUGO A G. Pressure-sensitive paint investigation of double-delta wing vortex flow manipulation [C] //43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- [6] WOODMANSEE M A, DUTTON J C. Method for treating temperature-sensitive effects of pressure-sensitive paints [C] // 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1997.
- [7] ENGLER R, KLEIN C, FONOVOV S, et al. Application of the PSP for investigation of the oscillating pressure fields [J]. Journal Royal Microscopical Society, 1998, 84 (3): 235-47.
- [8] MITSUO K, EGAMI Y, ASAI K, et al. Development of lifetime imaging system for pressure-sensitive paint [C] //Aiaa Aerodynamic Measurement Technology & Ground Testing Conference, 2002.
- [9] OUCHI H, IRIKADO T. PSP Measurement in the large-scale transonic wind tunnel and associated image data processing [C] // Aiaa Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2013.
- [10] YOUSSEF M, ALI B. Pressure-sensitive paint measurements on a moving store in the NRC 1.5 m blowdown wind tunnel [C] //AIAA, 2016.
- [11] 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.
- [12] 向星居, 郎卫东, 熊红亮. PSP 测量三角翼模型气动载荷的超声速风洞试验 [J]. 实验流体力学, 2010, 24 (3): 81-86.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 曹传军, 黄国平, 梁德旺. 毫米级平面叶栅的 PSP 测量 [J]. 实验流体力学, 2010, 24 (1): 68-73.
- [17] 韩昌, 李佳, 李雪英, 等. 基于 PSP 实验技术的双射流气膜冷却特性研究 [J]. 航空动力学报, 2010, 25 (12): 2770-2778.
- [18] 黄康, 王红彪, 黄辉, 等. 渐扩后倾肩臂孔平板气膜冷却特性实验研究 [J]. 实验流体力学, 2018, 32 (4): 47-52, 71.
- [19] 王文元. 基于图像信噪比选择优化高斯滤波尺度 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31 (10): 2483-2487.
- [20] 郝贤鹏, 任建岳. 科学级 TDI-CCD 相机噪声抑制及实现 [J]. 微计算机信息, 2010, 26 (2): 16-20.
- [21] 韩长材, 宋顾周, 马继明, 等. 科学级 CCD 相机噪声标定及特性分析 [J]. 微计算机信息, 2014, 5 (3): 233-238.
- [22] 张璐, 黄昊蒙. HJ-1 卫星 CCD 图像信噪比评估 [J]. 地理空间信息, 2013, 11 (3): 73-75.
- [23] 朱博, 王新鸿, 唐伶俐, 等. 光学遥感图像信噪比评估方法研究进展 [J]. 遥感技术与应用, 2010, 25 (2): 303-309.
- [24] 高连如, 张兵, 张霞, 等. 基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究 [J]. 遥感学报, 2007, 11 (2): 201-208.
- [25] HUBER J P, CARROLL B F. Application of dual sorption theory to pressure sensitive paints [J]. AIAA Journal, 1997, 35 (11): 1790-1792.
- [26] LIU T, SULLIVAN J P. Pressure and temperature sensitive paints [M]. New York: Springer, 2004.
- [27] 李国帅, 周强, 刘祥, 等. 压力敏感涂料特性及其校准技术实验研究 [J]. 航空学报, 2013, 34 (2): 227-334.
- [28] 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): 197-201.
- [29] 韩长材, 宋顾周, 马继明, 等. 科学级 CCD 相机噪声标定及特性分析 [J]. 现代应用物理, 2014, 5 (3): 233-238.
- [30] 任航, 张涛. 科学级 CCD 相机的降噪技术研究 [J]. 传感器与仪器仪表, 2009, 10 (8): 129-131.
- [31] FREEK D, MEER V D, DEJONG S M. Imaging spectrometry: based principles and prospective applications [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [32] 杨蕊. 动态序列遥感图像超分辨率重建技术研究 [D]. 西安: 中国科学院大学, 2019.
- [33] 刘建贵, 郑兰芬, 童庆禧. 遥感图像信噪比的估算 [J]. 应用基础与工程科学学报, 1999, 7 (4): 361.
- [34] 王文远. 基于去相关性准则的单幅图像信噪比估计 [J]. 计算机工程, 2010, 36 (1): 227-235.
- [35] 高连如, 张兵, 张霞. 基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究 [J]. 遥感学报, 2007, 11 (2): 203-208.