

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.01.01

# 风洞分布测压试验校准技术发展现状

李峰, 王洪博

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 调研了目前国内外表面压力分布测试试验校准技术, 分别总结了风洞试验中稳态压力分布和脉动压力分布的测试及校准现状。选取分布测压技术中具有代表性的压力扫描阀及压敏漆(PSP)测试校准技术展开论述, 介绍了包括校准原理、试验流程及校准溯源链等校准试验的关键要素。通过对比国内外风洞测压试验校准技术现状, 分析了我国测压校准体系存在的问题及相关解决方法, 提出了我国风洞压力分布测试校准技术的发展方向。

**关键词:** 风洞试验; 压力; 压力扫描阀; 压敏漆

**中图分类号:** TB935

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2020)01-0001-07

## Overview of Calibration Technology for Wind Tunnel Distribution Pressure Test

LI Feng, WANG Hongbo

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** By investigating the advanced technologies of surface pressure distribution test and calibration in the world, the current status of testing and calibration of steady and dynamic pressure distribution tests in wind tunnel is introduced. The representative techniques such as pressure scanning valve and pressure sensitive paint (PSP) in distributed pressure test are selected to illustrate, and the key elements of calibration test including calibration theory, test process and traceability are discussed. By comparing the current situation of calibration technology for wind tunnel pressure measurement at home and abroad, the problems and solutions of calibration for pressure test in China are analyzed, and the development direction of wind tunnel pressure distribution measurement and calibration technology in China in the future is put forward.

**Key words:** wind tunnel test; pressure; pressure scanning valve; pressure sensitive paint

## 0 引言

风洞试验是进行空气动力学研究、提供飞行器气动布局设计参数的重要手段之一。在风洞试验中, 测量飞行器表面压力分布, 能够为仿真分析和飞行器气动布局设计提供最为直接有效的试验参数。目前国内风洞模型表面压力分布测试主要采用两种方法——模型表面布设测压孔法和压敏漆(Pressure Sensitive Paint, PSP)测压法。模型表面布设测压孔法的测量准确度主要受测压孔设计、引压管结构和电子压力扫描测量准确度影响; 压敏漆测压试验准确度的影响因素包括激光性能、压敏涂层厚度、探针分子浓度、环境温度等。采用模型表面布设测压孔的方法测量分布压力的优点在于测量原理简单、技术成熟度高、测量准确性好, 而压敏漆(PSP)技术则能够提供空间上连续的测压数据。在风洞试验中, 通常采取两种方式同时测量, 从而达到获取更加准确丰富的试验数据的目的, 而针对

两种方法的校准技术和校准手段还有待进一步研究, 下面分别进行探讨与分析。

## 1 常规测压技术及校准现状

为保障风洞压力测试试验数据的可靠性, 所有的测量数据必须能够溯源到国家标准, 并且在整个测量过程中要能够清楚得到并控制测量不确定度, 因此通常需要对整个试验系统进行校准评估。评估的内容主要包括测压试验仪器的校准、数据处理方法、数据不确定度合成及表示方法。其中, 试验仪器的校准是评定试验系统测量数据可靠性的基础。通过校准测压试验仪器, 能够直观得到试验仪器的测量误差, 建立完整的溯源链, 提升试验数据的可信度。

### 1.1 常规分布测压系统校准

压力测试试验数据作为风洞试验中重要的试验结果, 其可靠性一直备受关注。美国 NASA 相关报告给出了风洞压力测试系统校准流程和数据不确定度评估

方法。目前, NASA 风洞试验通常采用兰利实验室制定的不确定度分析和校准试验规程。该实验室利用重复试验, 分离偏差和准确度的不确定度评估方法, 对压力测试系统进行了有效的校准研究<sup>[1]</sup>。

先进飞行器的研制和现有飞机型号的改进对风洞试验数据品质提出了更高的要求。世界各国针对自身风洞试验存在的问题, 均开展了试验校准工作, 并给出了数据可靠性评估。通过综合分析影响整个测压系统的不确定性, 梳理试验数据链, 对试验的每一个环节做出评估, 是整个校准流程最重要的环节。国外相关校准机构通过分析得出, 影响系统不确定性的最重要因素是各个组成仪器的准确性、校准程序、人为因素、环境以及测试数据分析等。此外, 校准结果的准确性在很大程度上取决于校准试验方法。

为满足客户对高准确度试验数据的要求, NASA 启动了风洞试验技术改进计划, 其目标之一就是将试验数据品质提高到符合国家标准水平。在这项计划中, 针对风洞试验压力测试系统的校准工作, NASA 依据美国国家标准与技术研究院《测量结果不确定度评估指南(NIST)》(Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST - 1297) 中制定的方法开展校准工作<sup>[2]</sup>。校准试验分为三个阶段: 第一阶段是选定研究目标, 包括风洞和测量设备型号等; 第二阶段是实验室校准, 采用标准设备, 在实验室中进行压力校准, 并对温度和重力影响进行校正; 第三阶段是利用兰利实验室的校准方法进行重复校准试验, 如图 1 所示, 采用集成的测试系统, 利用相对法对压力传感器等设备进行校准。实验数据采用二阶多项式拟合, 其系数由最小二乘法迭代确定。通过重复试验, 给出了线性灵敏度误差分布。

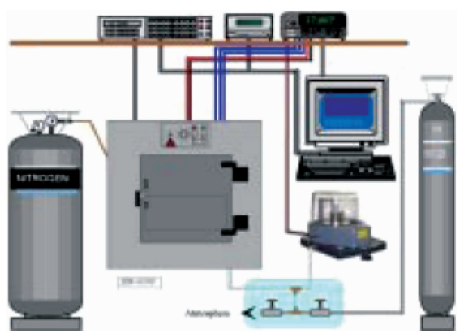


图 1 压力传感器校准实验

为保障实验准确度, 提升风洞技术水平, 瑞士 RUAG 建立了风洞试验数据质量保障体系<sup>[3]</sup>。对风洞

试验中测量的力、压力、温度等参数建立完整的溯源体系, 以提升风洞试验数据的可靠性。RUAG 校准实验室采用标准设备对风洞测压试验中用到的传感器和测试系统进行标准溯源, 通过规范校准流程提供更加精确可靠的校准结果。RUAG 风洞试验用传感器的溯源体系如表 1 所示, 表中给出了不同类型的传感器连接信号放大设备输出的信号类型、测量误差以及校准试验中标准传感器的误差, 其校准工作可以溯源到 RUAG 航空航天中心校准实验室。

表 1 RUAG 风洞测量系统校准要求和溯源体系

| 放大器<br>型号                    | 测量<br>参数 | 测量<br>误差 | 校准装<br>置误差 | 溯源体系                                    |
|------------------------------|----------|----------|------------|-----------------------------------------|
| Bridge<br>standard<br>BN100A | 变压比      | 0.0005%  | —          | PTB2 national<br>standard               |
| Calibration<br>unit K3608    | 变压比      | 0.0025%  | —          | HBM DKD certificate<br>(transfer cal. ) |
| ML38B                        | 变压比      | 0.0025%  | 0.0005%    | HBM DKD<br>certificate                  |
| ML01B                        | 电压值      | 0.03%    | 0.01%      | RA calibration<br>laboratory            |
| ML01B                        | 电流值      | 0.03%    | 0.01%      | RA calibration<br>laboratory            |
| ML801B<br>(8CH)              | 电压值      | 0.05%    | 0.01%      | RA calibration<br>laboratory            |

国内对静态和动态压力传感器的校准技术基本成熟。其中, JJG 860 - 2015《压力传感器(静态)检定规程》和 JJG 624 - 2005《动态压力传感器检定规程》分别规定了静态和动态压力传感器的首次检定、后续检定和使用中检验的校准方法<sup>[4-5]</sup>。数字压力计的检定主要依据的 JJG 875 - 2005《数字压力计检定规程》实行。对校准用仪器, 依据 JJG 624 - 2005《动态压力传感器检定规程》等进行校准检定。

尽管目前国内压力传感器的校准技术十分成熟, 但是还未形成面向风洞试验的原位校准方法和校准规程。国外标准机构均建有完善的风洞测试设备校准体系, 各个主要参数均能溯源到国家基准, 能够有效保障风洞试验数据的可靠性。因此, 为进一步提升我国风洞测压试验技术, 应大力开展面向风洞试验的校准技术研究, 包括风洞环境影响校准研究和原位校准技术研究等, 建立完善的数据溯源链, 并且提供可靠的

数据不确定度分析。

1.2 压力扫描阀校准技术现状

压力扫描阀是分布测压孔测压方法中的重要设备，国外以美国 AIAA 标准体系为代表的相关文献中，对压力扫描阀的校准工作给出了详细的校准要求和流程。AIAA-S-071A-1999《试验不确定度评定及其在风洞试验中的应用》(Assessment of Experimental Uncertainty with Application to Wind Tunnel Testing)中规定了电子压力扫描阀(ESP)的校准方法和准确度要求<sup>[6]</sup>。由于压力扫描阀具有多个测压通道，如果对每个通道均进行系统校准，需要采集大量数据，耗时较长、成本较高，所以根据实际校准经验，AIAA 标准建议在压力扫描阀系统不确定度评估时，可以随机选取扫描阀总通道数的 7% 进行校准。为提高数据准确性，在每次风洞试验前，采用六点校准技术校准电子压力扫描阀模块中的压力传感器，在试验中随时进行重新校准以补偿因温度变化所引起的零点漂移误差，同时，根据 AIAA92-3953《多通道测试系统不确定度方法研究》进行不确定度评估<sup>[7]</sup>。在给出的压力扫描阀测试系统数据不确定度评估中，要将传感器的温度效应作为系统偏差加入最终的误差拟合，给出置信区间为 95% 的误差带。

国内对压力扫描阀的校准研究较多，尤其是针对压力扫描阀的试验校准及温度特性校准等。目前国内常用的压力扫描阀主要采用 PSI 和 DAS 的产品，扫描阀的准确度等级以及允许的最大测量误差如表 2 所示。一般校准机构根据用户需求，按照 JJG 875-2005《数字压力计检定规程》有针对性地开展校准工作。

| 表 2 压力扫描阀准确度等级与最大允许误差 |        |
|-----------------------|--------|
| 准确度等级                 | 最大允许误差 |
| 0.01                  | ±0.01  |
| 0.02                  | ±0.02  |
| 0.05                  | ±0.05  |
| 0.1                   | ±0.1   |
| 0.2                   | ±0.2   |

中国航发沈阳发动机研究所邢威等人<sup>[8]</sup>对电子压力扫描阀校准工作中应着重考虑的相关要素进行了说明，包括压力标准装置的准确度、温度控制系统、校准压力点的选取等，并分析了压力扫描阀测试数据的

不确定度来源，给出了压力扫描阀不确定度评估方法。中国空气动力研究与发展中心校准测试实验室的黄健等人<sup>[9]</sup>针对国内在用的主要型号电子压力扫描阀开展了校准技术研究，提出了校准通用的技术要求、环境条件、校准仪器、校准方法、校准周期等，并编写了《风洞试验电子压力扫描阀校准规程》。

压力扫描阀原理简单、发展较早，目前技术已经十分成熟，也已经形成了较完善的校准体系，但是随着压力扫描阀校准技术的逐渐成熟，为进一步提高校准效率、降低校准成本，压力扫描阀校准技术逐渐向现场原位校准方向发展。现场原位校准是指在不拆卸被校设备的前提下，对被校设备进行校准工作。原位校准的优势在于能够最大程度上模拟设备在真实试验条件下的工作状态，能够更方便的对试验设备进行准确的校准评估。中国飞行试验研究院的高颖等人<sup>[10-11]</sup>在分析某发动机试车台上安装的 DSADSA3217 型气体压力扫描阀结构原理和技术要求的基础上，结合计算与试验方法，选用具有适当温度补偿的标准器并提出高度差修正方法，进行了气体压力扫描阀现场原位校准技术研究，形成一种无需对高度差引入的测量误差进行逐点通道修正的现场原位校准方法。

目前，压力扫描阀的现场原位校准已经取得了一定的研究成果，但是要完全实现现场原位校准，需要考虑大量的试验环境因素。风洞试验中的环境温度分布、湿度条件、测量高度差等均会对设备测量准确度产生影响。因此需要研究风洞试验中各种环境条件对测量设备的影响。为确定风洞试验条件中压力扫描阀测量准确度的影响因素，需要在实验室中进行单一环境变量的对比实验。

虽然压力扫描阀的实验室校准技术已经比较完善，但缺少统一的行业校准规范进行试验指导。为进一步提升校准技术，未来压力扫描阀的校准工作应向规范化和现场原位化方向发展，通过建立完善校准体系并研制现场校准装置，全面推进压力扫描阀规范化、标准化校准，同时应建立风洞测压试验溯源链，并开展压力测试系统原位校准研究。能准确得到测试系统实际工作中的测量准确度对试验数据的处理修正具有重要的意义。

2 先进测压技术与校准现状

随着风洞技术的发展，一些关于测试技术的先进理念被不断提出。先进飞行器的设计要求风洞试验能

够更加详细的掌握各项试验数据,从“全局”的角度充分理解模型及流场耦合状态<sup>[12]</sup>。传统上,绝大多数空气动力学数据都是以离散点的形式进行测量,很多时候需要研究人员通过外插拟合等手段对流场结构和状态进行推断研究。因此发展先进的全局测量技术,掌握直观的测量数据,对研究人员分析流场及模型状态具有重要意义。近年来,光学压敏漆技术作为一种有效的全局测压技术越来越成熟,在风洞测压试验中的作用越来越明显<sup>[13]</sup>。压敏漆测压技术是一种利用“氧猝灭”原理建立涂层所受压力与反射光强之间关系从而进行压力测量的方法。由于其灵活性大、测量原理先进、不受被测结构制约等优势而被广泛应用于表面压力测量试验中。相对于传统测压方法,光学压敏漆技术可以测量连续的面,极大地提高了测量压力数据的空间分辨力。压敏漆对被测结构要求较低,克服了难分布测压点的问题<sup>[14]</sup>。

## 2.1 压敏漆测量准确度影响因素

压敏漆(PSP)的测量准确度问题一直是制约压敏漆技术发展的主要因素。为提高PSP的测量准确度,目前研究人员主要聚焦于涂料的温度敏感性和测量灵敏度两个方面。

温度敏感性问题PSP技术的固有缺点,迫使研究人员结合使用PSP和温度敏感涂料(TSP)来校正模型表面的温度变化。对于PSP的温度效应,H. Zare-Behtash等人<sup>[15]</sup>研究了曼彻斯特大学航空物理实验室(APL)内部开发的两种涂料,一种使用盐酸作为溶剂(PSP-HCl),另一种则采用丙酮作为溶剂(PSP-Ace)。对比两种PSP配方的特点,发现PSP-HCL型压敏漆的测量准确度对温度依赖性较低。与PSP-Ace配方不同,PSP-HCl具有相对较低的温度敏感性,结合原位校准程序,能够提供更精确的超音速流场系统表面压力测量。

针对PSP测试灵敏度问题,Quinn M K等人<sup>[16]</sup>研究出两种内部压敏涂料(PSP)配方,并在低速状态下测试U形弯曲流场的流动。研究结果表明采用三硫苯基高氯酸钌(Ru(II))和铂-五氟苯基卟啉(PtTFPP)作为光活性分子,能够使PSP涂料具有较好的压力灵敏度。将这一型号压敏漆应用于低速不可压流场中能够很好地捕捉表面压力特性。

尽管PSP技术目前还存在一定的技术问题(与传统压力传感器相比,PSP的测量准确度有待提升),但是研究人员不断改进涂料配方和光学测试系统,使PSP

测试技术不断得到优化升级。通过不断研究新技术,并建立全面的校准系统,未来的PSP技术将更加完善并具有良好的应用前景。

## 2.2 压敏漆校准技术

在压敏涂料中,氧浓度和氧扩散率是影响压敏漆测量准确度的重要因素,由于温度会影响探针分子活性和氧扩散率,利用Stern-Volmer原理,压敏漆发光强度 $I$ 与对应的压强 $p$ 的关系可以表示为

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

其中,

$$A(T) = \frac{1}{1 + a p_{\text{ref}}}$$

$$B(T) = \frac{a p_{\text{ref}}}{1 + a p_{\text{ref}}} \quad (2)$$

式中: $a$ 为与压敏漆材料温度特性相关的系数,可以通过实验测得; $I_{\text{ref}}$ 与 $p_{\text{ref}}$ 分别为参考光强和参考压强,与压敏漆材料相关,可由实验校准得到。原则上,在实验室中利用压力校准腔进行实验,可以得到PSP光强与压强对应关系的校准曲线<sup>[17]</sup>。

相关报告表明,德荷风洞采用校准腔对PSP样品进行静态校准,给出PSP灵敏度与压力和温度之间的关系。在试验数据处理中,采集6组图片:①无风条件下压力强度图像;②无风条件下光照强度图像;③有风条件下压力强度图像;④有风条件下光照强度图像;⑤黑暗条件下压力强度信号图像;⑥黑暗条件下光强图像。

在风洞运行前和运行后分别采集无风条件下的图像,用来校正由于涂层不均匀引起的测量误差。黑暗条件下的图像用于校正由于设备导致的光强噪声。

目前国际上已经开发了动态校准方法来确定PSP的响应时间<sup>[18]</sup>。最常见的动态校准装置是激波管<sup>[19-22]</sup>,如图2所示,通过隔膜破碎产生的激波,提供压力的快速阶跃变化。压力阶跃的大小与激波的速度有关,而激波速度取决于驱动段和被动段之间的压差。在校准过程中,PSP样品与激波管壁齐平安装,使激波不受PSP样品干扰。参考压力传感器安装在激波管的壁面中。用光电倍增管(PMT)采集PSP的发光信号,当激波通过测量点时记录PSP的响应。或者,利用高速摄像采集全场光强信号<sup>[23]</sup>。激波管的优势在于其产生的阶跃压力上升时间非常短,因此能够较准确地测量响应时间。但是,激波管校准PSP响应时间

时,不能同时获得诸如相位延迟和振幅衰减等频率响应数据。

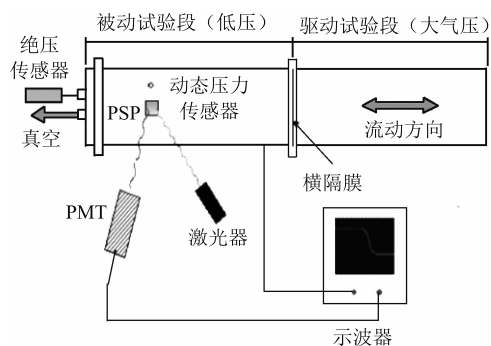


图2 PSP激波管响应时间校准装置

快开阀是另一个用于产生阶跃压力,以进行PSP响应时间校准的装置。在给定压力下,将一个PSP样品放入一个封闭的试验腔中,通过迅速打开电磁阀,产生压力的阶跃变化。通常电磁阀的开启时间约为几百微秒。电磁阀具有结构简单、操作方便的优点,但其阶跃压力的上升时间比激波管长,因此校准频率范围比较小。

Gregory等人<sup>[24]</sup>将射流振荡器(Fluidic Oscillators)用于动态校准。振荡射流的频率随着供给压力的增加而增加,工作范围为1~10 kHz。Sakamura等人<sup>[25]</sup>在此基础上开发了脉动射流装置(2002)用于动态校准PSP。射流振荡器的优点是可以产生高频动态压力。当用于动态校准时,可对PSP样品进行定位,振荡射流作用于PSP表面,使PSP涂层能够感应压力变化。脉动射流装置利用高速运转的切割轮盘作为高频动态压力源,对射流进行切割,测试PSP样品的动态响应。脉冲频率受装置尺寸、切割槽数量和轮盘转速的限制,当前校准设备的脉冲频率限制为1.5 kHz。不同于激波管,这种装置可以在校准频率范围内提供相应的相位和振幅数据。

因为振幅衰减和相位延迟可以作为频率的函数直接测量,声学驻波管也被用于PSP的动态校准<sup>[26-27]</sup>。校准时,PSP样品涂于驻波管的端盖,并由高强度激光激发,利用光电倍增管(PMT)采集涂料发光信号。由于沿谐振管长度方向的压力场是一维的,因此端盖上的压力场可以看作是均匀的,并且随时间变化。通过改变谐振管的长度和直径,可以改变谐振管的谐振频率和谐波,从而对PSP进行动态校准。

目前国内的压敏漆校准技术基本与国外一致,通

常采用静态校准腔的方法进行试验室校准以及in-situ原位校准,校准腔静态校准利用激励光源、校准腔与图像采集及处理系统等得到压敏漆样品的校准曲线。利用激波管测量PSP的响应时间进行动态校准。

西北工业大学的刘波等人<sup>[28]</sup>以国产压敏漆涂料为研究对象,利用负压容器、直流真空泵、直流电源、压力控制开关和高准确度多功能压力表和数据采集及处理系统构建了国内首个压力敏感涂料测量系统,并对涂料进行了校准试验,相关校准工作分为两个阶段,选取不同的试验校准压力点分别检测了试验系统的工作性能和压敏漆荧光强度与压力对应特性,发现涂料样件在各测量点的图像数据经处理与线性回归后,与实际测量值相对误差减小5%,而随着涂料存放时间的延长,由于涂料中光敏分子功能退化,导致涂料光强与压强特性呈现出非线性变化。2017年中国空气动力研究与发展中心的林敬周等人<sup>[29]</sup>对压敏漆的特性进行研究,提出了将压敏漆测试技术应用于高超声速风洞试验的关键技术及解决方法,通过选取耐温载体基质研制耐温型压敏漆,并利用静态校准及原位In-situ等校准手段得到相应的校准曲线和该型号压敏漆的温度特性,初步建立了适用于高超声速风洞的PSP试验技术软硬件平台。

国内外研究表明,原位校准不确定度主要受PSP的温度效应和模型变形导致的表面光照变化影响。因此,针对压敏漆技术的校准工作要集中在压敏漆温度效应的研究以及修正模型形变带来的图像匹配误差。

目前,压敏漆的校准技术还处于不断发展中,现有的激波管校准技术虽然能够较直观地得到动态压敏漆的上升时间,但是其动态幅频特性以及动态灵敏度的校准还尚不成熟。而且,目前国际上还没有建立统一的PSP校准系统。为了更快更好地推广压敏漆技术的应用,应深入研究压敏漆的校准技术,使其更加成熟,试验数据更加准确可靠。

### 2.3 压敏漆校准技术的发展趋势

通过提高PSP测量准确度,克服灵敏度、温度依赖性等优点,未来PSP技术在流场表面压力测试中起到的作用会越来越大。根据PSP现有的技术水平以及发展趋势来看,PSP技术将成为未来稳态和非稳态流场试验中的主要压力测试手段。因此,系统研究压敏漆测试准确度影响因素,研究压敏漆校准方法,建立统一的校准指导规范是未来压敏漆校准技术发展的重要一步。同时,为了满足压敏漆技术高准确度和高效

率的测量需求<sup>[30]</sup>,未来将建立完善的溯源链,优化校准方法,推进压敏漆校准技术向准确化和高效化发展。

### 3 结语

近年来,我国风洞试验中压力测试技术不断进步,相应的校准技术也需要改进。为提升我国风洞试验数据的可靠性,未来对风洞测压试验的校准要向“准确化、专业化、高效化”方向发展。准确化是指通过研究科学合理的校准方法、数据处理算法及不确定度计算手段,建立完整溯源体系;专业化是指建立风洞测压试验校准指南,有针对性地解决风洞试验压力测试校准问题;高效化就是要综合现有技术,提出更多的原位校准方法,在风洞试验中加入可计量性设计概念,节约校准时间。为实现“准确化、专业化、高效化”的目标,未来风洞测压试验校准技术要从以下几个方面进行改进提升:①建立完善的测压系统溯源体系,从压力传感器到信号放大器以及信号采集设备的校准工作均需溯源至国家最高标准;②为提高校准能力,节约风洞试验成本,需进一步开展压力扫描阀原位校准技术研究,建立面向压力扫描阀的检定规程;③完善压敏漆校准技术,建立压敏漆校准方法和温度效应校准技术指南;④研究压敏漆动态特性校准技术,实现对压敏漆幅频特性和相频特性的校准,并建立相关检定规程。以上改进均能提升测压试验数据的可靠性,对风洞试验具有重要意义。

### 参 考 文 献

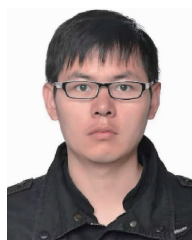
- [1] John T A, Tchong P, Burkett C, et al. Characterization and Uncertainty Analysis of a Reference Pressure Measurement System for Wind Tunnels[J]. 1999.
- [2] Barry N T, Chris E K. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results [Z]. US: NIST, 1994.
- [3] Claus Zimmermann, Werner Häberli and Raphael Christen. Quality assurance in the windtunnel[Z]. Switzerland: RU-AG Aerospace, 2008.
- [4] JJG 860-2015 压力传感器(静态)检定规程[S]. 2015.
- [5] JJG 624-2005 动态压力传感器检定规程[S]. 2005.
- [6] AIAA-S-071A-1999 Assessment of Experimental Uncertainty with Application to Wind Tunnel Testing [S]. US: AIAA, 1999.
- [7] Cahill D. Development of an Uncertainty Methodology for Multiple-channel Instrumentation Systems[C]//28th Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville, TN: AIAA, 1992.
- [8] 邢威. 压力扫描阀的校准方法及其测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(5): 72-74.
- [9] 黄健, 程虎, 刘威伟, 等. 电子压力扫描阀的校准[J]. 计量与测试技术, 2016, 43(11): 8-9.
- [10] 高颖, 任智勇, 杨志, 等. DSA3217 型气体压力扫描阀现场原位校准方法[J]. 中国科技信息, 2017(13): 33-34.
- [11] 高颖, 崔坚, 李儒宽, 等. 某型发动机试车台气体压力扫描阀现场校准方法研究[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(10): 95-98.
- [12] Kegelmann J T, Danehy P M, Schwartz R J. Advanced Capabilities for Wind Tunnel Testing in the 21st Century[C]//48th AIAA Aerospace Science Meeting. Orlando, Florida: AIAA, 2010: 4-7.
- [13] Nakakita K, Arizono H. Visualization of Unsteady Pressure Behavior of Transonic Flutter Using Pressure-Sensitive Paint Measurement[C]//27th AIAA Applied Aerodynamics Conference. 2009.
- [14] Quinn M K, Yang L, Kontis K. Pressure-Sensitive Paint: Effect of Substrate [J]. Sensors, 2011, 11(12): 11649-11663.
- [15] Zare-Behtash H, Gongora-Orozco N, Kontis K, et al. Application of Novel Pressure-sensitive Paint Formulations for the Surface Flow Mapping of High-speed Jets [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(5): 852-864.
- [16] Quinn M K, Gongora-Orozco N, Kontis K, et al. Application of Pressure-sensitive Paint to Low-speed Flow Around a U-bend of Strong Curvature[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 48: 58-66.
- [17] Liu T, Sullivan J P. In Situ Calibration Uncertainty of Pressure-Sensitive Paint [J]. AIAA Journal, 2003, 41(11): 2300-2302.
- [18] Gregory J W, Sakaue H, Liu T, et al. Fast Pressure-Sensitive Paint for Flow and Acoustic Diagnostics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1): 303-330.
- [19] Asai K, Nakakita K, Kameda M, et al. Recent Topics in Fast-responding Pressure-sensitive Paint Technology at National Aerospace Laboratory [C]//Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, 2001. 19th International Congress on ICIASF 2001. Cleveland, Ohio: IEEE, 2001.
- [20] Sakaue H, Sullivan J P. Time Response of Anodized Aluminum Pressure-Sensitive Paint [J]. AIAA Journal, 2001, 39(10): 1944-1949.
- [21] Thomas Juliano, Di Peng, Christopher Jensen, et al. PSP Measurements on an Oscillating NACA 0012 Airfoil in Compressible Flow [C]//41st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. 2011.

- [22] Ryan M M, David P H, James G, et al. Dynamic Calibrations for Fast-Response Porous Polymer/Ceramic Pressure-Sensitive Paint[C]//AIAA Ground Testing Conference. 2013.
- [23] Fujii S, Numata D, Nagai H, Asai K. Development of ultra-fast-response anodized-aluminum pressure-sensitive paints[C]//AIAA Aerosp. Sci. Meet., 51st. Grapevine, TX: AIAA, 2013.
- [24] Gregory J, Sakaue H, Sullivan J. Unsteady pressure measurements in turbomachinery using porous pressure sensitive paint [C] // 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno, NV: AIAA, 2002.
- [25] Sakamura Y, Suzuki T, Matsumoto M, et al. Optical measurements of high-frequency pressure fluctuations using a pressure-sensitive paint and Cassegrain optics[J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13(10): 1591–1598.
- [26] McGraw C M, Shroff H, Khalil G, et al. The phosphorescence microphone: A device for testing oxygen sensors and films[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(12): 5260–5266.
- [27] McMullen R M, Huynh D P, Gregory J, et al. Dynamic Calibrations for Fast-Response Porous Polymer/Ceramic Pressure-Sensitive Paint[C]//AIAA Ground Testing Conference. San Diego, CA: AIAA, 2013.
- [28] 刘波, 周强, 郑立新, 等. 压力敏感涂料测量系统及涂料校准实验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2007(6): 72–75.
- [29] 林敬周, 解福田, 钟俊, 等. 高超声速风洞压敏漆试验技术[J]. 航空学报, 2017, 38(7): 192–200.
- [30] 彭迪, 刘应征. 目标“更快更高更强”——快响应压敏漆(Fast PSP)技术研究现状与发展趋势[C]//第十届全国流体力学青年研讨会论文集. 北京: 中国力学学会, 2017.

---

收稿日期: 2019–06–03; 修回日期: 2019–08–27

### 作者简介



李峰(1991–), 男, 河北保定人, 助理工程师, 硕士, 国防计量检定员, 主要从事脉冲压力校准、风洞试验校准、超声速流体运动机理、高频动态压力校准方法、热声耦合机理等技术研究。