爆 炸 与 冲 击
Explosion and Shock Waves
DOI：10.11883/bzycj-2026-0099

非理想激波管的动态压力测量不确定度评定

邵煜[1]，姚贞建[1]，夏江锋[1]，史博[2]

（1.武汉工程大学电气信息学院，湖北 武汉 430205；
2.中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所，北京 100095）

摘 要：针对非理想激波管动态压力测量不确定度评定中普遍忽略幅值波动、未充分考虑入射激波速度衰减，导致测量不确定度评定结果不可靠的问题，提出了一种非理想激波管动态压力测量不确定度的可靠评定方法。该方法综合考虑和分析了动态压力稳态幅值和波动幅值的测量不确定度。首先，根据建立的稳态幅值可溯源测量模型及基于分布式激波速度测量方案，探究了入射激波速度衰减拟合不确定度，以及端面处入射激波马赫数与低压室介质比热比之间相关性引入的不确定度的影响，并通过GUM方法实现其测量标准不确定度可靠评定。然后，针对波动幅值测量不确定度，综合考虑了波动幅值相邻时刻数据间的交互作用以及重复测量结果之间的分散性，引入共轭贝叶斯方法，实现了具有时变特性的波动幅值测量标准不确定度评定。最后，通过稳态幅值和波动幅值的测量标准不确定度合成，实现非理想激波管动态压力测量不确定度可靠评定。激波管动态压力测量实验结果显示，马赫数法因忽略波动幅值且未充分考虑入射激波速度衰减影响，导致动态压力测量不确定度评定结果偏小，而采用所提出方法得到的非理想激波管动态压力测量相对不确定度为1.04%，有效提升了不确定度评定结果的可靠性。

关键词：激波管；压力测量；波动幅值；不确定度评定；稳态幅值

中图分类号:TH71　　**国标学科代码**：410.55　　**文献标识码**：A

Uncertainty evaluation of dynamic pressure measurement in non-ideal shock tube

Shao Yu[1], Yao Zhenjian[1], Xia Jiangfeng[1], Shi Bo[2]

*(1.School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China;
2.Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China)*

Abstract：To address the problem that amplitude fluctuations are generally ignored and incident shock wave velocity attenuation is not fully considered in the uncertainty evaluation of dynamic pressure measurement in a non-ideal shock tube, thereby leading to unreliable evaluation results, a reliable method for evaluating the measurement uncertainty of dynamic pressure in the non-ideal shock tube was proposed. In this method, the measurement uncertainties of the stable amplitude and the fluctuation amplitude of dynamic pressure were comprehensively considered and analyzed. First, based on the established traceable measurement model for stable amplitude and the distributed incident shock wave velocity measurement scheme, the fitting uncertainty of the incident shock wave velocity attenuation was investigated, together with the influence of the uncertainty introduced by the correlation between the incident shock wave Mach number at the end face and the specific heat ratio of the medium in the driven section. Their standard measurement uncertainties were then reliably evaluated using the GUM method. Then, for the measurement uncertainty of the fluctuation amplitude, the interaction between adjacent data and the dispersion among repeated measurement results were comprehensively considered. The conjugate Bayesian method was introduced to achieve the evaluation of the standard measurement uncertainty of the fluctuation amplitude with time-varying features. Finally, by combining the standard measurement uncertainties of the stable amplitude and the fluctuation amplitude, a reliable evaluation of the measurement uncertainty of dynamic pressure in the non-ideal shock tube was achieved. The experimental results of

*收稿日期：2026-04-01　　；　修回日期：2026-10-28　　；
基金项目：国家自然科学基金（52575635）
第一作者：邵　煜（1998－　），男，硕士，　E-mail: shaoy_729@163.com；
通信作者：姚贞建（1991－　），男，博士，副教授. E-mail: yao_buaa@126.com。

录用稿件，非最终出版稿

dynamic pressure measurement in the shock tube show that the Mach number method ignores the fluctuation amplitude and fails to fully consider the influence of incident shock wave velocity attenuation, thus underestimating the dynamic pressure measurement uncertainty. In contrast, the relative uncertainty of dynamic pressure measurement in the non-ideal shock tube obtained by the proposed method is 1.04%, which effectively improves the reliability of the uncertainty evaluation results.

Keywords： Shock tube; Pressure measurement; Fluctuation amplitude; Uncertainty evaluation; Stable amplitude

激波管作为压力传感器动态校准的常用装置，可以产生有纳秒级上升时间和毫秒级持续时间的阶跃压力信号，准确测量激波管动态压力并合理评定其测量不确定度，是提高压力传感器校准精度的基础，直接影响压力传感器在航空航天、爆炸力学、智能检测等领域的应用范围和测量可靠性[1-5]。目前动态压力计量测试领域普遍采用理想的阶跃函数表征激波管动态压力，而在实际入射激波传播过程中，由于激波产生为非理想过程，入射激波的非均匀性、试验环境等因素的耦合作用，动态压力幅值不可避免地表现出一定的非规律性波动特征，同时入射激波速度也会随着传播距离衰减[6, 7]，导致入射激波速度测量结果与激波管端面处实际速度之间存在偏差。若仍采用理想阶跃函数表征动态压力变化过程，将导致动态压力幅值测量误差增大，降低动态压力测量不确定度评定结果的可靠性，从而限制压力传感器在实际工程中的应用。

近年来，国内外学者关于激波管动态压力测量进行了大量研究和探索，美国国家标准与技术研究院联合Temple大学共同组建了一套双膜激波管系统[8]，以均匀气动激波动态压力测量模型为基础，在激波管低压室管壁上安装三个压电传感器直接测量入射激波速度，实现动态压力测量，但由于受到压电传感器感应面面积和数据采集率等因素影响，导致动态压力测量结果的相对不确定度达到2.3%。瑞典技术研究所构建了高压室和低压室长度都为2 m，动态压力范围约为0.26 MPa-0.7 MPa的激波管系统[9]，并通过自研上升时间为200 ns的光纤传感器对激波管动态压力进行直接测量，然而因受激波管振动、测量噪声、光纤传感器谐振和动态特性不准确等因素的影响，导致激波管动态压力测量不确定度可靠性不高，GUM法评定重复测量结果的相对不确定度大于1%，在压力上升阶段的相对不确定度达到5%。英国国家物理实验室构建了最大阶跃压力幅值为1.4 MPa的塑料激波管[10]，高压室使用氮气增压，基于激波管动态压力测量模型，通过在管壁上安装多个压力传感器，对入射激波速度的衰减进行补偿，得到入射激波速度测量结果的相对不确定度为0.1%，并且结合黄铜和乙缩醛材料制成传感器安装载体，减小了振动对动态压力测量的影响，采用GUM法评定激波管动态压力测量结果的相对不确定度为0.45%。北京长城计量测试技术研究所通过在激波管低压室管壁上安装多个传感器[11]，测量低压室初始压力、低压室初始温度和入射激波传播速度参数，初步实现激波管动态压力幅值的测量，GUM法评定动态压力结果的相对不确定度为1.19%。

现有方法虽然在一定程度上实现了激波管动态压力测量不确定度的评定，但仅考虑了动态压力稳态幅值的测量不确定度，未充分分析波动幅值的影响，导致测量不确定度评定结果偏小。此外，在稳态幅值测量过程中，未探究入射激波传播过程中速度衰减的影响，使得入射激波速度测量结果与激波管端面处实际入射激波速度存在偏差，进而降低稳态幅值测量精度，影响动态压力测量不确定度评定结果的可靠性。为了解决上述问题，本文提出一种非理想激波管动态压力测量不确定度可靠评定方法，该方法综合考虑和分析了动态压力稳态幅值和波动幅值的测量不确定度。针对稳态幅值测量中的入射激波衰减问题，采用多点分布式测量方法对入射激波速度衰减进行补偿，同时充分考虑入射激波速度衰减拟合、端面处入射激波马赫数和低压室介质比热比之间的相关性对不确定度评定的影响，并依据GUM方法评定补偿后稳态幅值的测量不确定度。针对具有时变特征的波动幅值，在充分考虑重复测量数据分散性及相邻时刻数据间交互作用的基础上，引入共轭贝叶斯方法评定波动幅值的测量不确定度。最后，根据稳态幅值和波动幅值测量不确定度合成，实现激波管动态压力测量不确定度可靠评定。

录用稿件，非最终出版稿

1. 激波管动态压力测量模型建立

1.1 激波管工作原理

激波管一般由高压室和低压室组成，中间通过膜片隔开。在激波管工作时，向高压室冲入气体，当高压室和低压室差压超过膜片所能承受的最大压力时膜片破裂，破裂后高压室气体冲入低压室形成入射激波[12]。入射激波传播至低压室端面形成反射激波，该反射激波形成的压力上升时间短，表现为阶跃压力形式，其稳态幅值可根据理想激波管理论建立的测量模型以及工作介质参数测量结果得到。

如图1所示，由于激波不均匀、激波管振动以及实验条件不理想等因素的耦合作用，非理想激波管动态压力幅值包括恒定的稳态幅值以及随时间变化的波动幅值，而现有的激波管动态压力测量不确定度评定仅考虑了稳态幅值，忽略了波动幅值对评定结果的影响，将会导致测量不确定度评定结果不准确。

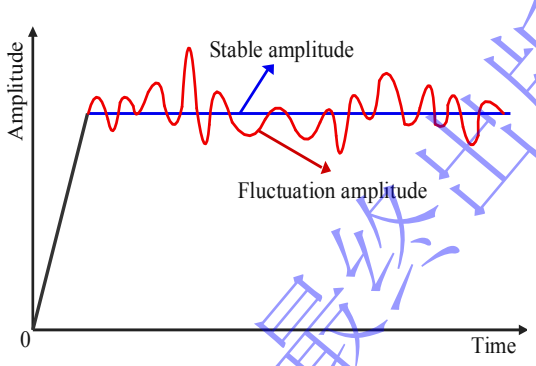


图 1 激波管动态压力

Fig.1 Dynamic pressure in shock tube

1.2 激波管动态压力测量模型建立

激波管动态压力由稳态幅值和波动幅值构成，表示为

$$\Delta p_n = \Delta p_0 + w_n \tag{1}$$

式中：Δp_0 为动态压力稳态幅值，w_n 为动态压力波动幅值。

基于理想激波管理论和动量守恒方程，激波管动态压力的稳态幅值测量模型[13-15]表示为

$$\Delta p_0 = 2p_1\frac{\gamma_1(M_s^2-1)}{\gamma_1+1}\left[\frac{M_s^2(3\gamma_1-1)-\gamma_1+3}{M_s^2(\gamma_1-1)+2}\right] \tag{2}$$

式中：M_s 为端面处入射激波马赫数，p_1 为低压室初始压力，γ_1 为低压室介质比热比。

其中，端面处入射激波马赫数测量模型表示为：

$$M_s = \frac{V_s}{c_1} = \frac{V_s}{\sqrt{\dfrac{\gamma_1 RT_1}{m}}} \tag{3}$$

式中：V_s 为端面处入射激波速度，c_1 为低压室介质中声速，γ_1 为低压室介质比热比，m 为低压室介质分子量，R 为低压室气体常数，T_1 为低压室初始温度。

在激波管动态压力测量实验中，端面处入射激波速度通常采用马赫数法[16]间接估计。马赫数法根据低压室管壁上两个测速压力传感器之间的间距与入射激波传播时间之比计算端面处入射激波速度[17,18]。然而，受测速压力传感器安装位置的限制，马赫数法的端面处入射激波速度的测量位置通常与实际激波管低压室端面存在一定距离，如图 2 所示。马赫数法使用其中 C3、C4 的测速压力传感器，其测量的速度点位于 v_3 ）。由于入射激波在传播过程中存在速度衰减，导致马赫数法所得速度值 v_3

录用稿件，非最终出版稿

无法代表端面处的真实速度值V_s。为了减小入射激波速度衰减对动态压力幅值结果的影响，本文通过一种基于 m 分布式测量方法来获取不同位置处的入射激波速度，如图 2 所示。基于最小二乘拟合，建立激波管端面处入射激波速度预测模型。

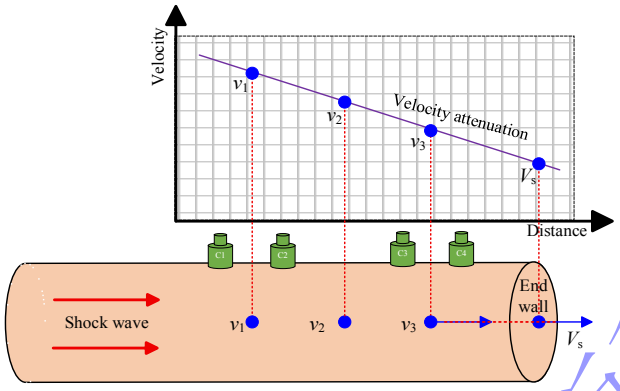


图 2 入射激波速度测量方案

Fig.2 Measurement scheme of incident shock wave velocity

因为测速压力传感器之间的间距通常较小，且激波在相邻测点间的速度衰减可近似为线性变化，因此用平均速度作为入射激波在两个相邻测速压力传感器中点的速度。不同位置处的入射激波速度的数学模型为

$$v_i = \frac{d_i}{t_i}(i=1,2,3) \tag{4}$$

式中：d_i为测速压力传感器间距，t_i为入射激波传播时间。

基于此，端面处入射激波预测速度可通过最小二乘法线性拟合估计得到，线性拟合方程表示为

$$V_i = ax_i + b \tag{5}$$

式中：a为拟合方程斜率，b为拟合方程截距，x_i为测速点位置。

2. 激波管动态压力测量不确定度来源分析

根据式(1)可知，激波管动态压力测量不确定度$u(\Delta p_n)$主要来源包括稳态幅值测量不确定度$u(\Delta p_0)$和波动幅值测量不确定度$u(w_n)$。对于稳态幅值，本文结合激波管空气动力学理论和激波速度衰减拟合建立相应的测量模型，依据不确定度传播律分析各不确定度分量向稳态幅值测量不确定度的传播过程，并采用GUM方法对稳态幅值测量不确定度进行有效评定。对于波动幅值，由于实际测量过程中无法建立能够准确描述波动幅值变化规律的可靠测量模型，且波动幅值测量数据具有明显的时变特性。故本文采用共轭贝叶斯方法，充分考虑波动幅值单时刻测量数据之间的分散性及相邻时刻数据之间的交互作用。

根据稳态幅值测量模型式(2)可知稳态幅值测量不确定度$u(\Delta p_0)$的主要来源包括端面处入射激波马赫数测量不确定度$u(M_s)$、低压室初始压力测量不确定度$u(p_1)$和低压室介质比热比测量不确定度$u(\gamma_1)$。$u(w_n)$为动态时变信号，其测量不确定度主要与任意时刻重复测量信号间的分散程度和任意两个相邻时刻信号间的相互作用有关。

端面处入射激波马赫数测量不确定度$u(M_s)$主要来源包括端面处入射激波速度测量不确定度$u(V_s)$和低压室介质中声速测量不确定度$u(c_1)$。端面处入射激波速度测量不确定度$u(V_s)$的主要来源包括：端面速度拟合不确定度$u(f)$、传感器间距测量不确定度$u(d_i)$、入射激波传播时间测量不

录用稿件，非最终出版稿

确定度$u(t_i)$、测速点位置测量不确定度$u(x_i)$。$u(c_1)$主要来源包括：低压室介质比热比测量不确定度$u(\gamma_1)$、低压室初始温度测量不确定度$u(T_1)$、低压室介质分子量测量不确定度$u(m)$、低压室气体常数测量不确定度$u(R)$。具体不确定度来源及其传播关系如图3所示。

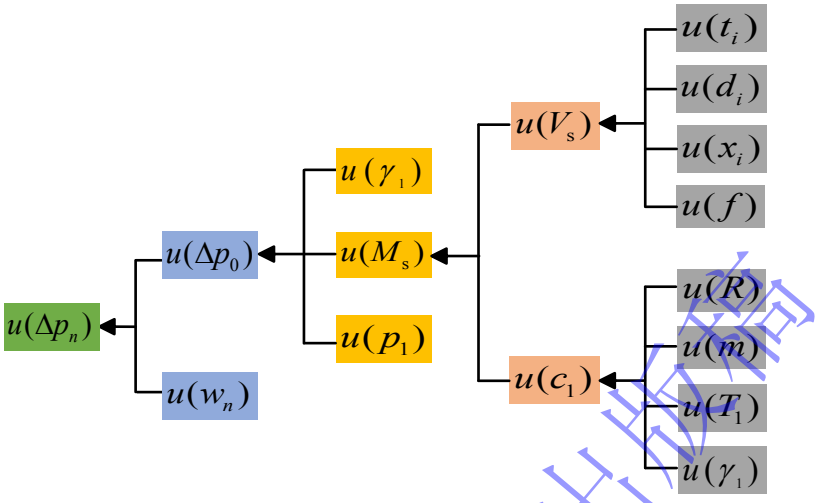


图 3 不确定度来源分析图

Fig.3 Analysis diagram of uncertainty sources

3 激波管动态压力测量不确定度评定

3.1 激波管实验装置

本实验采用的装置由北京长城计量测试技术研究所建立，如图4所示，低压室和高压室长度分别为7 m和4 m，内径都为0.1 m，工作介质均为空气。本实验采用铝膜片厚度为0.14 mm，低压室初始温度采用STT-T Pt100温度传感器测得为301.25 K，低压室初始压力采用CYB-2S压力传感器测得为99.38 kPa。入射激波速度由四个型号相同的CY-YD-205测速压力传感器(分别记为C1、C2、C3和C4)测量。如图4所示，其中除C2与C3间距为0.8 m，其余相邻两个间距都为0.4 m，C4与低压室端面间距为0.19 m。在激波管端面处安装了PCB M113B31压电式压力传感器，灵敏度为3.421 V/MPa，用于直接测量激波管动态压力。传感器响应信号通过型号为NICOLET Pro44的高速数据采集系统进行采集，采样频率设为5 MHz。

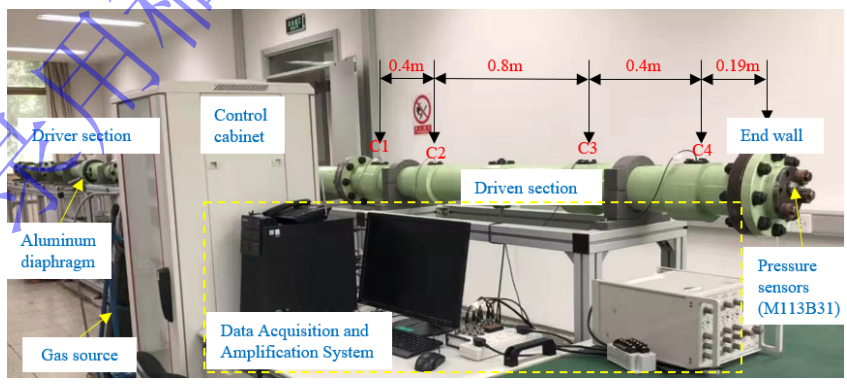


图 4 激波管实验系统

Fig.4 Experimental shock tube system

3.2 稳态幅值测量不确定度评定

由式(2)可知，稳态幅值测量不确定度$u(\Delta p_0)$的来源包括低压室初始压力测量不确定度$u(p_1)$、端面

录用稿件，非最终出版稿

处入射激波马赫数测量不确定度$u(M_s)$和低压室介质比热比测量不确定度$u(\gamma_1)$，下面分别对各不确定度分量进行分析与评定。

3.2.1 端面处入射激波马赫数测量不确定度$u(M_s)$

由式(3)可知，端面处入射激波马赫数测量不确定度$u(M_s)$的来源包括端面处入射激波速度测量不确定度$u(V_s)$和低压室介质中声速测量不确定度$u(c_1)$。

(1) 端面入射激波速度测量不确定度$u(V_s)$

为了统一计算，记第一个测速压力传感器 C1 位置为初始位置$(x_0=0\text{m})$，第一个测速压力传感器与低压室端面的距离为$x_4=1.79\text{m}$。管壁测速压力传感器输出曲线如图 5 所示，三个测速点处的入射激波速度及端面处预测速度见表 1，可以看到，入射激波速度会随着传播距离的增加而逐渐衰减，且衰减规律近似线性。

表1 不同位置的入射激波速度

Table 1 Incident shock wave velocities at different positions

位置	测速点位置/m	入射激波速度/(m/s)
x_1	0.2	446.807
x_2	0.8	445.199
x_3	1.4	443.997
x_4(端面)	1.79	443.097

通过最小二乘法线性拟合估计入射激波到达端面处的速度。入射激波端面处预测速度V_s的拟合方程为

$$V_i=-2.3x_i+447.185 \tag{6}$$

拟合结果如图 6 所示，图中横坐标为测速点位置，纵坐标为入射激波速度。实验中入射激波速度的衰减率为 2.3 (m/s)/m。

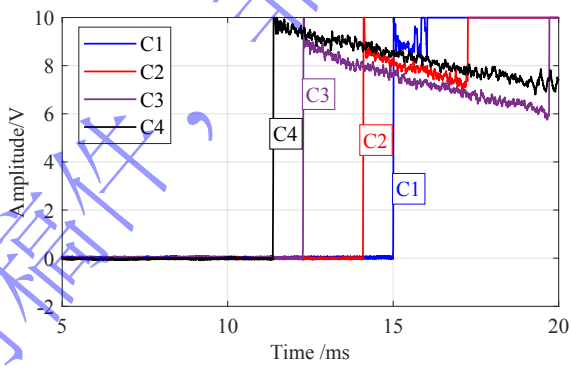


图 5 四个测速压力传感器输出曲线

Fig.5 Outputs of the four velocity sensors

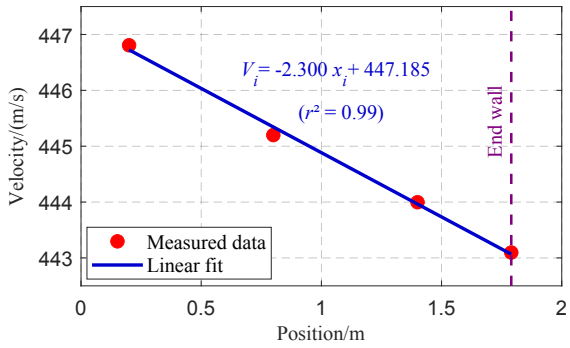


图 6 入射激波速度拟合结果

Fig.6 Incident shock wave velocity fitting results

录用稿件，非最终出版稿

端面处入射激波速度由式(4)和式(5)共同推算得到，由式(4)和式(5)可知端面处入射激波速度的测量不确定度V_s的来源包括端面速度拟合不确定度$u(f)$、测速点位置测量不确定度$u(x_i)$、测速压力传感器间距测量不确定度$u(d_i)$和入射激波传播时间测量不确定度$u(t_i)$。

1) 端面速度拟合不确定度$u(f)$

V_s通过线性拟合方程$V_i=-2.3x_i+447.185$得到，因此V_s的测量不确定度来源包括了拟合误差引入的不确定度分量。端面速度拟合不确定度可由标准偏差表示：

$$u(a)=\sqrt{\frac{\frac{1}{n-2}\sum(v_i-V_i)^2}{\sum(x_i-\bar{x})^2}}=0.236 \tag{7}$$

$$u(b)=\sqrt{\frac{1}{n-2}\sum(v_i-V_i)^2}\times\sqrt{\frac{1}{n}+\frac{\bar{x}^2}{\sum(x_i-\bar{x})^2}}=0.221 \tag{8}$$

$$u(f)=\sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial a}u(a)\right)^2+\left(\frac{\partial y}{\partial b}u(b)\right)^2+2x_i\,\mathrm{cov}(a,b)}=0.261 \tag{9}$$

式中：$\bar{x}$为所有x_i的平均值，$u(a)$为拟合方程斜率的不确定度，$u(b)$为拟合方程截距的不确定度，$\mathrm{cov}(a,b)$为斜率与截距的协方差。

2) 测速压力传感器间距测量不确定度$u(d_i)$

相邻测速压力传感器的距离经测量依次分别为$d_1=0.4$ m、$d_2=0.8$ m、$d_3=0.4$ m，采用 B 类方法评定可以得到侧壁测速压力传感器位置测量不确定度都相同，即$u(d_1)=u(d_2)=u(d_3)=2.5\times10^{-4}$ m。

3) 入射激波传播时间测量不确定度$u(t_i)$

根据四个测速压力传感器得到的四个上升沿进行计算，为了减小上升沿初始阶段和末尾阶段严重的非线性对入射激波传播时间计算精度的影响，因此选取靠近上升沿中间段的 10 组数据，并取相邻上升沿间时间差的均值，作为激波通过测速压力传感器的传播时间，三处入射激波传播时间结果分别为$t_1=0.895\times10^{-3}$ s、$t_2=1.79\times10^{-3}$ s和$t_3=0.902\times10^{-3}$ s。通过计算 10 组数据时间差的标准差，并根据贝塞尔公式可得相邻测速压力传感器之间的传播时间测量不确定度，又因入射激波传播时间的测量不确定度还与采样频率有关，本实验采样频率为 5 MHz，则采样频率引入的测量不确定度$u(s)=2\times10^{-7}$ s，所以三处入射激波传播时间测量不确定度为：

$$\begin{aligned}
u(t_1)&=\sqrt{\left(\frac{\sigma(t_1)}{\sqrt{n}}\right)^2+u^2(s)}=2.017\times10^{-7}\ \mathrm{s}\\
u(t_2)&=\sqrt{\left(\frac{\sigma(t_2)}{\sqrt{n}}\right)^2+u^2(s)}=2.120\times10^{-7}\ \mathrm{s}\\
u(t_3)&=\sqrt{\left(\frac{\sigma(t_3)}{\sqrt{n}}\right)^2+u^2(s)}=2.022\times10^{-7}\ \mathrm{s}
\end{aligned} \tag{10}$$

4) 测速点位置测量不确定度$u(x_i)$

测速点位置经测量分别为$x_1=0.2$ m、$x_2=0.8$ m、$x_3=1.4$ m，其测量误差取决于测速压力传感器安装孔距误差、安装孔与测速压力传感器之间的安装公差以及测速压力传感器感应面的面积，采用 B 类方法评定可以得到测速点的测量不确定度都相同，为$u(x_1)=u(x_2)=u(x_3)=2.5\times10^{-4}$ m。

测速压力传感器间距测量不确定度$u(d_i)$和入射激波传播时间测量不确定度$u(t_i)$引入的不确定度表示为$\bar{u}(V)$，计算公式如下所示。

采用稿件，非最终出版稿

三处局部入射激波速度测量不确定度为：

$$\begin{cases} u(V_1)=\sqrt{\left(\dfrac{\partial v}{\partial d_1}u(d_1)\right)^2+\left(\dfrac{\partial v}{\partial t_1}u(t_1)\right)^2}=0.276\ \text{m/s} \\ u(V_2)=\sqrt{\left(\dfrac{\partial v}{\partial d_2}u(d_2)\right)^2+\left(\dfrac{\partial v}{\partial t_2}u(t_2)\right)^2}=0.139\ \text{m/s} \\ u(V_3)=\sqrt{\left(\dfrac{\partial v}{\partial d_3}u(d_3)\right)^2+\left(\dfrac{\partial v}{\partial t_3}u(t_3)\right)^2}=0.275\ \text{m/s} \end{cases} \tag{11}$$

则：

$$\overline{u}(V)=\frac{\left(u(V_1)+u(V_2)+u(V_3)\right)}{3}=0.23\text{m/s} \tag{12}$$

将上述$u(f)$、$u(x_i)$和$\overline{u}(V)$三个分量进行合成，则端面处入射激波速度测量不确定度为：

$$u(V_s)=\sqrt{u^2(f)+\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_i}u(x_i)\right)^2+\overline{u}^2(V)}=0.348\ \text{m/s} \tag{13}$$

(2) 低压室介质中声速测量不确定度$u(c_1)$

由 2.2 节可知，低压室介质中声速测量不确定度$u(c_1)$包括低压室初始温度测量不确定度$u(T_1)$、低压室介质比热比测量不确定度$u(\gamma_1)$、低压室介质分子量测量不确定度$u(m)$和低压室气体常数测量不确定度$u(R)$。

1) 低压室初始温度测量不确定度$u(T_1)$

低压室初始温度采用高精度 PT100 标准温度传感器测量为$T_1=301.25\text{K}$，根据该温度传感器使用说明书，可知其在 301.25 K 时的测量准确度为 0.1 K，则低压室初始温度测量不确定度分量$u(T_1)=0.1\,\text{K}$。

2) 低压室介质分子量测量不确定度$u(m)$

空气的分子量为$m=0.02897\ \text{kg/mol}$，其测量不确定度为$u(m)=0.00001\ \text{kg/mol}$。

3) 低压室气体常数测量不确定度$u(R)$

空气的气体常数为$R=8.314\ \text{J/mol/K}$，其测量不确定度为$u(R)=0\ \text{J/mol/K}$[19]。

4) 低压室介质比热比测量不确定度$u(\gamma_1)$

实验采用空气作为激波管高压室和低压室的工作介质。其中空气比热比取值为$\gamma_1=1.400$，其测量不确定度$u(\gamma_1)=0.001$。

根据计算可得低压室介质中声速为 347.936 m/s，将上述$u(T_1)$、$u(\gamma_1)$、$u(m)$和$u(R)$四个分量进行合成，得到低压室介质中声速测量不确定度为：

$$u(c_1)=\sqrt{u^2{}_1+u^2{}_2+u^2{}_3+u^2{}_4}=0.149\ \text{m/s} \tag{14}$$

式中：$u_1=\dfrac{\partial c_1}{\partial T_1}u(T_1)$；$u_2=\dfrac{\partial c_1}{\partial \gamma_1}u(\gamma_1)$；$u_3=\dfrac{\partial c_1}{\partial m}u(m)$；$u_4=\dfrac{\partial c_1}{\partial R}u(R)$。

根据式(3)可得端面处入射激波马赫数为 1.273，将上述所得$u(V_s)$和$u(c_1)$两个不确定度分量进行合成，可得端面处入射激波马赫数测量不确定度为：

$$u(M_s)=\sqrt{\left(\frac{\partial M_s}{\partial V_s}\right)^2u^2(V_s)+\left(\frac{\partial M_s}{\partial c_1}\right)^2u^2(c_1)}=1.14\times10^{-3} \tag{15}$$

录用稿件，非最终出版稿

3.2.2 低压室初始压力测量不确定度$u(p_1)$

低压室初始压力示数采用 HX601 型数字压力计测量得到，其值为$p_1=0.09938$ MPa，根据该数字压力计的使用说明书，可知其压力测量极限误差为 0.1%且服从均匀分布，因此低压室初始压力的测量不确定度为$u(p_1)=0.1\times0.1\%/\sqrt{3}=5.77\times10^{-5}$ MPa。

3.2.3 稳态幅值测量不确定度评定结果

稳态幅值由式(2)可得$\Delta p_0=0.185$ MPa，稳态幅值测量不确定度$u(\Delta p_0)$由$u(p_1)$、$u(M_s)$、$u(\gamma_1)$三个分量合成得到，其中$u(M_s)$与$u(\gamma_1)$之间存在相关性，其余分量之间互不相关，则：

$$u(\Delta p_0)=\sqrt{u_5^2+u_6^2+u_7^2+\Gamma_c}=9.61\times10^{-4}\ \text{MPa} \tag{16}$$

式中：$u_5=\dfrac{\partial\Delta p_0}{\partial p_1}u(p_1)$；$u_6=\dfrac{\partial\Delta p_0}{\partial M_s}u(M_s)$；$u_7=\dfrac{\partial\Delta p_0}{\partial\gamma_1}u(\gamma_1)$；$\Gamma_c=2\dfrac{\partial\Delta p_0}{\partial\gamma_1}\dfrac{\partial\Delta p_0}{\partial M_s}\rho_{M_s,\gamma_1}u(M_s)u(\gamma_1)$，其中$\rho_{M_s,\gamma_1}$为$M_s$与$\gamma_1$间的相关系数。

两种方法的稳态幅值各个参数的值和测量不确定度分量结果如表 2 所示。马赫数法的测量不确定度结果为 8.49×10^{-4} MPa，分布式测量法的测量不确定度结果为 9.61×10^{-4} MPa，分布式测量法结果偏大是因为额外考虑了线性拟合引入的不确定度和端面处入射激波马赫数与低压室介质比热比之间相关性引入的不确定度。

表2 标准不确定度汇总表

Table 2 Summary table of standard uncertainty

参数	符号	单位	分布式测量法		马赫数法	
			测量值	标准不确定度	测量值	标准不确定度
测速传感器间距(C1-C2)	d_1	m	0.4	2.50×10^{-4}	—	—
测速传感器间距(C2-C3)	d_2	m	0.8	2.50×10^{-4}	—	—
测速传感器间距(C3-C4)	d_3	m	0.4	2.50×10^{-4}	0.40	2.50×10^{-4}
测速点位置1	x_1	m	0.2	2.50×10^{-4}	—	—
测速点位置2	x_2	m	0.8	2.50×10^{-4}	—	—
测速点位置3	x_3	m	1.4	2.50×10^{-4}	—	—
激波传播时间(C1-C2)	t_1	s	0.895×10^{-3}	2.017×10^{-7}	—	—
激波传播时间(C2-C3)	t_2	s	1.79×10^{-3}	2.120×10^{-7}	—	—
激波传播时间(C3-C4)	t_3	s	0.902×10^{-3}	2.022×10^{-7}	0.902×10^{-3}	2.99×10^{-8}
端面处入射激波速度	V_s	m/s	443.097	0.348	443.951	0.278
低压室初始温度	T_1	K	301.25	0.1	301.25	0.1
低压室介质比热比	γ_1	—	1.400	0.001	1.400	0.001
低压室气体常数	R	J/mol/K	8.314	0	8.314	0
低压室介质分子量	m	kg/mol	0.02897	1×10^{-5}	0.02897	1×10^{-5}
端面处入射激波马赫数	M_s	—	1.273	1.14×10^{-3}	1.28	9.6×10^{-4}
低压室介质中声速	c_1	m/s	347.936	0.149	347.936	0.149
低压室初始压力	P_1	MPa	0.09938	5.77×10^{-5}	0.09938	5.77×10^{-5}
稳态幅值	Δp_0	MPa	0.185	9.61×10^{-4}	0.193	8.49×10^{-4}

3.3 波动幅值测量不确定度评定

由于动态压力在形成过程中表现为时变信号，波动幅值测量不确定度$u(w_n)$评定不仅需要考虑相邻时刻之间数据的相关作用，还需兼顾多次重复测量信号间的分散性。鉴于此，本文引入共轭贝叶斯方法[20]对该波动幅值测量不确定度进行评定。

在对波动幅值进行不确定度评定前，必须先确定初始时刻的标准不确定度。定义如下

录用稿件，非最终出版稿

$$u(w_1)=z_{\alpha/2}\frac{s}{c\sqrt{M}} \tag{17}$$

其中，$z_{\alpha/2}$ 来自标准正态分布表；α 为置信度；s 和 M 分别为初始时刻重复数据的标准差和数据个数；c 为偏差修正因子，由下式给出

$$c=\sqrt{\frac{2}{M-1}}\Gamma\left(\frac{M}{2}\right)\Big/\Gamma\left(\frac{M-1}{2}\right) \tag{18}$$

其中，$\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数。

假设在时刻 n 的 M 次重复测量数据 $G_n=\left[g_1(n),g_2(n),...,g_j(n),...,g_M(n)\right]^{\mathrm{T}}$ 服从正态分布 $N(\mu,\sigma^2)$。根据统计原理可得：

$$\bar{G}_n=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}g_j(n) \tag{19}$$

$$S_n=\sum_{j=1}^{M}(g_j(n)-\bar{G}_n \tag{20}$$

其中，$\bar{G}_n$ 和 S_n 相互独立且满足 $\bar{G}_n\sim N\left(\mu,\frac{\sigma^2}{M}\right)$、$\frac{S_n}{\sigma^2}\sim\chi_M{}^2$。

μ 和 σ^2 的共轭先验分布分别为

$$\mu\sim N\left(\bar{G}_n,\frac{\sigma^2}{M}\right) \tag{21}$$

$$\sigma^2\sim\Gamma^{-1}\left(\frac{M-1}{2},\frac{S_n}{2}\right) \tag{22}$$

则 (μ,σ^2) 的联合先验分布密度为：

$$f\left(\mu,\sigma^2\right)=f\left(\mu\right)f\left(\sigma^2\right)=\frac{\sqrt{M}S_n{}^{M-1}}{\sqrt{2M\pi}\cdot\Gamma\left(\frac{M-1}{2}\right)}\cdot\left(\frac{1}{\sigma^2}\right)^{\frac{M+1}{2}}\cdot\mathrm{e}^{\left[-\frac{S_n+M(\mu-\bar{G}_n)^2}{2\sigma^2}\right]} \tag{23}$$

同理，$n+1$ 时刻的 M 次重复测量数据 $G_{n+1}=\left[g_1(n+1),g_2(n+1),...,g_j(n+1),...,g_M(n+1)\right]^{\mathrm{T}}$ 根据统计原理计算为：

$$\bar{G}_{n+1}=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}g_j(n+1) \tag{24}$$

$$S_{n+1}=\sum_{j=1}^{M}(g_j(n+1)-\bar{G}_{n+1} \tag{25}$$

G_{n+1} 的似然函数为

$$L\left(\mu,\sigma^2\,|\,G\right)=\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{\frac{M}{2}}\mathrm{e}^{\left[-\frac{S_{n+1}+M(\mu-\bar{G}_{n+1})^2}{2\sigma^2}\right]} \tag{26}$$

根据贝叶斯公式，联合后验分布密度函数如下

$$f\left(\mu,\sigma^2|G\right)\propto\left(\frac{\sigma^2}{2M}\right)^{-\frac{1}{2}}\mathrm{e}^{\left[-\frac{2M(\mu-\bar{G})^2}{2\sigma^2}\right]}\cdot\left(\frac{1}{\sigma^2}\right)^{\frac{2M+1}{2}}\mathrm{e}^{\left(-\frac{H}{2\sigma^2}\right)} \tag{27}$$

其中，$\bar{G}=\frac{1}{2}\left(\bar{G}_n+\bar{G}_{n+1}\right)$，$H=\frac{M}{2}\left(\bar{G}_n-\bar{G}_{n+1}\right)^2+S_n+S_{n+1}$。

则 (μ,σ^2) 的后验分布服从：

录用稿件，非最终出版稿

$$\mu \sim N\left(\bar{G},\frac{\sigma^2}{2M}\right) \tag{28}$$

$$\sigma^2 \sim \Gamma^{-1}\left(M-\frac{1}{2},\frac{H}{2}\right) \tag{29}$$

因此，基于在时刻 n 的测量数据的先验信息，在时刻 $n+1$ 的 m 个重复测量数据的测量不确定度可以被定义为：

$$u(w_{n+1})=\sqrt{\frac{H}{2M-3}},n=1,2,... \tag{30}$$

基于 n 时刻得到的均值和测量不确定度作为 $n+1$ 时刻数据的先验信息，通过贝叶斯后验更新从而得到 $n+1$ 时刻的测量不确定度。最终通过连续迭代计算得到每个时刻的测量不确定度。

根据前述实验条件进行了 5 次重复测量实验，在实验中使用 Butterworth 低通滤波器进行预处理来消除压力传感器谐振振荡和产生的噪声影响，滤波器截至频率设置为 10 kHz[21]。输出曲线如图 7 所示。

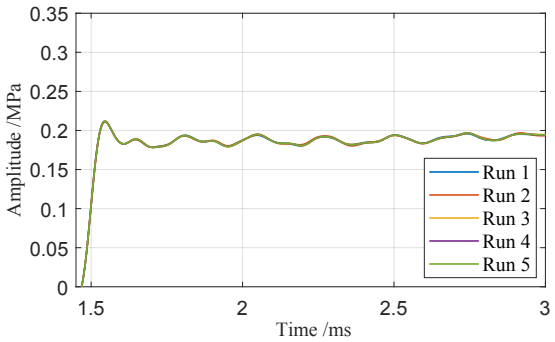


图 7 滤波后原始信号

Fig.7 Filtered original signal

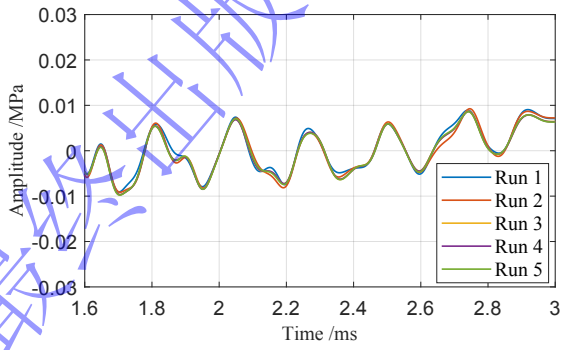


图 8 波动幅值

Fig.8 Fluctuation amplitude

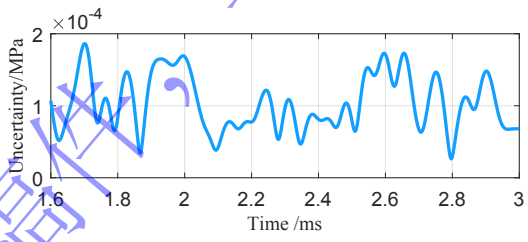


图 9 波动幅值的不确定度评定结果

Fig.9 Uncertainty evaluation results of fluctuation amplitude

选取图 7 中去掉上升沿部分的数据段并减去稳态幅值，得到的波动幅值如图 8 所示，通过共轭贝叶斯方法进行波动幅值测量不确定度评定，在计算初始时刻测量不确定度时取置信度为 95%。得到各时刻波动幅值的测量不确定度结果如图 9 所示，由于波动幅值具有时变特性，为获得表征整个测量过程的不确定度结果，对各时刻的测量不确定度进行算术平均，结果为 9.8×10^{-5} MPa。

3.4 动态压力测量不确定度评定结果

激波管动态压力测量不确定度 $u(\Delta p_n)$ 由 $u(\Delta p_0)$ 和 $u(w_n)$ 两个分量合成得到，且两个分量互不相关，则：

$$u(\Delta p_n)=\sqrt{u^2(\Delta p_0)+u^2(w_n)} \tag{31}$$

得到各时刻的合成标准不确定度结果如图 10 所示。在 1.6 ms 至 3.0 ms 的观测窗口内，合成标准不确定度的最大值为 9.78×10^{-4} MPa，最小值为 9.58×10^{-4} MPa。对各时刻的合成标准不确定度进行算术平均，结果为 9.67×10^{-4} MPa。

录用稿件，非最终出版稿

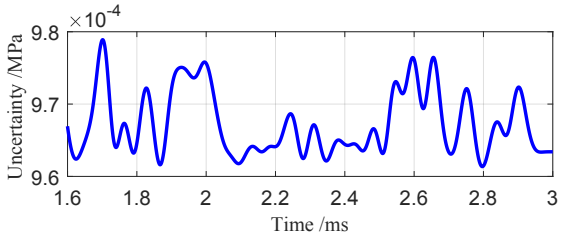


图 10 合成标准不确定度

Fig.10 Combined standard uncertainty

合成标准不确定度反映测量结果的分散性，但不能直接表示测量结果可能包含的范围。为给出具有一定置信水平的测量结果，本文进一步计算扩展不确定度。取包含因子[22,23] $k=2$ 时扩展不确定度对应的置信水平约为 95%。扩展不确定度可表示为

$$U = k \times u(\Delta p_n) \tag{32}$$

相对不确定度为

$$U_r = \frac{U}{\Delta p_0} = 1.04\% \tag{33}$$

各时刻的扩展不确定度结果如图 11 所示。

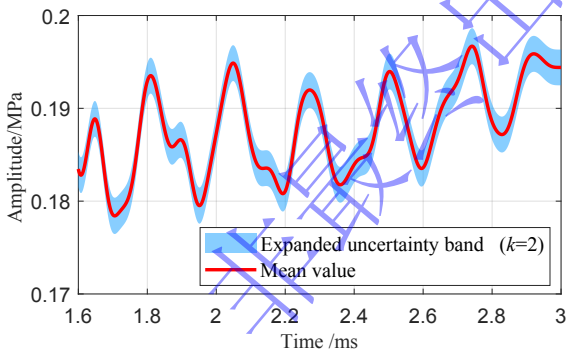


图 11 扩展不确定度

Fig.11 Expanded uncertainty

4 结论

针对激波管动态压力测量不确定度评定中普遍忽略幅值波动、未充分考虑入射激波速度衰减导致测量不确定度评定结果不可靠问题，提出一种非理想激波管动态压力测量不确定度评定方法。通过激波管实验并对其结果进行分析得到以下结论：

(1) 构建了基于四个测速传感器的入射激波速度分布式测量方法，根据测量结果得到入射激波速度随传播距离呈近似线性衰减规律，在采用 0.14 mm 厚度的铝膜片情况下，采用最小二乘拟合得到入射激波速度衰减率为 2.3 (m/s)/m，端面处入射激波速度测量不确定度为 0.348 m/s，根据激波管动态压力稳态幅值测量模型，基于 GUM 方法评定其测量不确定度为 9.61×10^{-4} MPa。

(2) 针对动态压力波动幅值测量不确定度，充分考虑了波动幅值相邻时刻之间数据交互作用及重复测量结果的分散性，引入共轭贝叶斯方法实现了波动幅值测量不确定度可靠评定。弥补了 GUM 方法无法处理波动幅值测量不确定度评定的弊端，评定得到波动幅值测量不确定度为 9.8×10^{-5} MPa。

(3) 通过激波管动态压力幅值测量及不确定度合成理论，评定得到动态压力测量的标准不确定度为 9.67×10^{-4} MPa，相对不确定度为 1.04%。通过对动态压力测量不确定度传播过程的量化分析得到，激波管端面处入射激波速度的测量精度及激波速度衰减拟合引入的不确定度分量会对动态压力测量不确定度评定结果产生较大影响，因此未来研究将优化激波速度分布式测量和衰减规律拟合方法，进一

录用稿件，非最终出版稿

步提高端面处入射激波速度测量精度，减小激波速度测量不确定度的影响，进而优化非理想激波管动态压力测量不确定度评定。

参考文献：

[1] PLANKO U, SVETE A, KUTIN J. Characterization of Spektra DPE-02 dynamic pressure exciter for the dynamic calibrations of pressure sensors [J]. Measurement: Sensors, 2025, 38: 101689. **DOI:** 10.1016/j.measen.2024.101689.

[2] 杨学广， 张晓光， 邢志国. 航空发动机动态压力测试发展与展望[J]. 科技展望, 2015, 25(27): 144. **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8289.2015.27.132.

YANG X G, ZHANG X G, XING Z G. Development and prospect of aeroengine dynamic pressure testing [J]. Science and Technology, 2015, 25(27): 144. **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8289.2015.27.132.

[3] PITAKARNNOP J, WIWATAPINAI P. Predicting pressure step and shock front speed in dynamic pressure calibration using a shock tube by CFD method [J]. Measurement: Sensors, 2025, 38: 101688. **DOI:** 10.1016/j.measen.2024.101688.

[4] 李强，王中宇，王卓然. 压力传感器动态校准不确定度评定[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(5): 847-856. **DOI:** 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0356.

LI Q, WANG Z Y, WANG Z R. Evaluation of uncertainty in dynamic calibration of pressure sensors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(5): 847-856. **DOI:** 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0356.

[5] 原玢. 冲击波超压测试系统的动态不确定度研究[D]. 太原：中北大学, 2012. 27-36.

YUAN B. Research on dynamic uncertainty of the shock wave overpressure test system [D]. Taiyuan: North University of China, 2012. 27-36.

[6] HARGIS J, PETERSEN E. Shock-tube boundary-layer effects on reflected-shock conditions with and without CO2 [J]. AIAA Journal, 2017, 55(3): 902-912. **DOI:** 10.2514/1.j055253.

[7] SVETE A, KUTIN J. Characterization of a newly developed diaphragmless shock tube for the primary dynamic calibration of pressure meters [J]. Metrologia, 2020, 57(5): 055009. **DOI:** 10.1088/1681-7575/ab8f79.

[8] HANSON E, OLSON D, LIU H, et al. Towards traceable transient pressure metrology [J]. Metrologia, 2018, 55(2): 275-283. **DOI:** 10.1088/1681-7575/aaad1b.

[9] ZELAN M, ARRHEN F, JARLEMARK P, et al. Characterization of a fiber-optic pressure sensor in a shock tube system for dynamic calibrations [J]. Metrologia, 2015, 52(1): 48-53. **DOI:** 10.1088/0026-1394/52/1/48.

[10] DOWNES S, KNOTT A, ROBINSON I. Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical physical and Engineering Sciences, 2014, 372(2023): 20130299. **DOI:** 10.1098/rsta.2013.0299.

[11] 杨军，薛斌. 激波管管长对阶跃压力波形的影响分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 252-257. **DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2019.03.035

YANG J, XUE B. Effects of shock tube length on step pressure waveform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(3): 252–257. **DOI:** 10.13465/j.cnki.jvs.2019.03.035.

[12] NATIVEL D, COOPER S, LIPKOWICZ T, et al. Impact of shock-tube facility-dependent effects on incident-and reflected-shock conditions over a wide range of pressures and Mach numbers [J]. Combustion and Flame, 2020, 217: 200-211. **DOI:** 10.1016/j.combustflame.2020.03.023.

[13] 姚贞建， 舒星研， 王成， 等. 基于模型修正的激波管反射阶跃压力幅值高精度溯源方法[J]. 工业计量, 2023, 33(2): 1-5. **DOI:** 10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2022.0163.

YAO Z J, SHU X Y, WANG C, et al. A high-accuracy method for traceability of shock tube reflection step pressure amplitude based on model correction [J]. Industrial Measurement, 2023, 33(2): 1-5. **DOI:** 10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2022.0163.

[14] YAO Z, LIU X, WANG C, et al. Improved traceable measurement of the reflected step pressure in shock tube with the compensation of shock wave attenuation [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 107: 106302. **DOI:** 10.1016/j.ast.2020.106302.

[15] 薛莉. 双膜激波管技术在动压校准中的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014. 18-27.

XUE L. The research of double diaphragm shock tube in dynamic pressure calibration [D]. Taiyuan: North University of China, 2014. 18-27.

[16] SARRAF C, DAMION J P. Dynamic pressure sensitivity determination with Mach number method [J]. Measurement Science and Technology,

录用稿件，非最终出版稿

2018, 29(5): 054006. **DOI:** 10.1088/1361-6501/aaa664.

[17] MATTHEWS C, PENNECCHI F, EICHSTADT S, et al. Mathematical modelling to support traceable dynamic calibration of pressure sensors [J]. Metrologia, 2014, 51(3): 326-338. **DOI:** 10.1088/0026-1394/51/3/326.

[18] 杨凡，孔德仁，姜波，等. 基于激波管校准的冲击波压力传感器动态特性研究[J]. 南京理工大学学报，2017，41(3)：330-336. **DOI:** 10.14177/j.cnki.32-1397n.2017.41.03.009.

YANG F, KONG D R, JIANG B, et al. Dynamic characteristic of shock wave pressure sensor based on shock tube calibration [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(3): 330-336. **DOI:** 10.14177/j.cnki.32-1397n.2017.41.03.009.

[19] YAO Z, LI Y, DING Y, et al. Improved shock tube method for dynamic calibration of the sensitivity characteristic of piezoresistive pressure sensors [J]. Measurement, 2022, 196: 111271. **DOI:** 10.1016/j.measurement.2022.111271.

[20] 程银宝. 现代不确定度理论及应用研究[D]. 合肥：合肥工业大学, 2017. 35-60.

CHENG Y B. Research on modern uncertainty theory and its applications [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. 35-60.

[21] YAO Z, DING Y, LI Y, et al. Experimental investigation of pressure characteristics behind the reflected shock waves in a metrological shock tube [J]. Metrologia, 2022, 59(5): 055008. **DOI:** 10.1088/1681-7575/ac8d98.

[22] 于大洋，刘业路，孔庆有，等.正弦压力标准装置测量不确定度评定[J]. 机械管理开发, 2025, 40(8): 280-282. **DOI:** 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2025.08.097.

YU D Y, LIU Y L, KONG Q Y, et al. Measurement uncertainty evaluation of sinusoidal pressure standard device [J]. Mechanical Management and Development, 2025, 40(8): 280-282. **DOI:** 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2025.08.097.

[23] WANG J, DENG H, WU Y, et al. A self-adaptive method for the assessment of dynamic measurement uncertainty [J]. Measurement, 2022, 196: 111116. **DOI:** 10.1016/j.measurement.2022.111116.

录用稿件，非最终出版稿