

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209947

激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计*

李永生,姚贞建,丁义凡

(武汉工程大学电气信息学院 武汉 430205)

摘要:提出一种激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计方法。首先,基于压力传感器阶跃响应特性,建立激波管反射阶跃压力上升时间估计理论模型;其次,采用经验模态分解实现阶跃响应信号噪声分量消除,提取衰减振铃分量;然后,基于衰减正弦拟合估计衰减振铃分量的第一峰值时间和振荡周期;最后,根据理论模型实现激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计。仿真实验结果表明,阶跃压力上升时间估计平均相对误差为2.57%,比传统方法和直接拟合法的平均相对误差分别减小了约7.3倍和2倍。激波管实测实验结果表明,在铝膜片厚度分别为0.25和0.07 mm的条件下,反射阶跃压力上升时间估计均值分别为0.712和0.876 μs ,相对误差分别为0.14%和1.9%,明显小于传统方法测量相对误差(7.5%和4.3%),方法有效提高了激波管反射阶跃压力上升时间的估计精度,并且具有更强的鲁棒性。

关键词:激波管;阶跃压力;经验模态分解;正弦拟合;上升时间

中图分类号: TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

High-accuracy estimation of the rise time of shock tube reflection step pressure

Li Yongsheng, Yao Zhenjian, Ding Yifan

(School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: A high-accuracy estimation method for the rise time of shock tube reflection step pressure is proposed. First, a theoretical model for estimating the rise time of shock tube reflected step pressure is formulated, which is based on the step response characteristics of the pressure sensor. Secondly, the empirical mode decomposition is used to eliminate the noise components of step response signal, and the attenuation ringing component is extracted. Thirdly, the first peak time and oscillation period of the attenuation ringing component are estimated based on an attenuation sine fitting. Finally, the high-accuracy estimation of the rise time of shock tube reflection step pressure is realized according to the theoretical model. Simulation results show that the average relative error of the rise time estimation of step pressure is 2.57%, which is about 7.3 times and 2 times lower than those of the traditional method and the direct fitting method, respectively. Shock tube experiments show that the mean of the estimation values of rise time are separately 0.712 μs and 0.876 μs , and the measurement relative errors are 0.14% and 1.9% under the cases of 0.25 mm and 0.07 mm aluminum diaphragms. It is obviously smaller than the relative errors (7.5% and 4.3%) of the measurement results of traditional methods. These results indicate that the proposed method improves the estimation accuracy of the rise time of shock tube reflection step pressure effectively and has stronger robustness.

Keywords: shock tube; step pressure; empirical mode decomposition; sine fitting; rise time

0 引言

激波管是动态压力计量领域的重要装置,在其低压室端面可以产生上升时间 $<1 \mu\text{s}$ 且持续时间为毫秒级的

反射阶跃压力信号,已被广泛应用于航空航天、工业制造、武器装备等领域中压力传感器的动态校准任务^[1-2]。激波管反射阶跃压力信号的主要特征参数包括幅值、上升时间和持续时间,3个参数决定了激波管用于压力传感器动态校准任务中的幅值范围和频率范围^[3-4],因此对

收稿日期:2022-06-13 Received Date: 2022-06-13

* 基金项目:国家自然科学基金(52005202)项目资助

激波管反射阶跃压力参数准确估计是保证压力传感器动态校准结果可靠性的关键。

近年来,国内外学者针对激波管反射阶跃压力的特征参数估计进行了大量的探索和研究。美国在2002年发布的《动态压力传感器校准指南》^[5]和2005年由北京长城计量测试技术研究所负责起草了《动态压力传感器检定规程》^[6]都系统性地描述了激波管反射阶跃压力幅值的溯源方法和不确定度评定过程。Downes等^[7]从激波管反射阶跃压力发生原理和大量实验结果分析出发,研究了实验条件对反射阶跃压力幅值的影响。Yao等^[8]从激波衰减出发,研究了提高反射阶跃压力幅值溯源精度的补偿方法。此外,北京长城计量测试技术研究所杨军等^[9]结合仿真与实测实验,研究了激波管管长对阶跃压力平台持续时间的影响。目前对激波管反射阶跃压力的幅值溯源和平台持续时间的研究已经取得了一系列的成果和进展,但是对阶跃压力上升时间的估计仍然处于起步阶段。其原因在于激波管产生的反射阶跃压力上升时间通常 $<1\ \mu\text{s}$,甚至可以达到几十纳秒,目前研制的高频压力传感器仍然受到测量原理和基础材料发展的限制,无法准确实现该类快速上升的阶跃压力信号的直接测量。

针对激波管反射阶跃压力上升时间无法直接测量问题,杨军等^[10]基于分析压力传感器阶跃响应特性提出了一种阶跃压力上升时间间接估计方法。该方法假设压力传感器为二阶系统,通过阶跃响应的拉氏变换,建立了阶跃响应信号第一峰值时间和振荡周期与阶跃压力上升时间的理论数学模型,为激波管反射阶跃压力上升时间的有效估计提供了新思路。然而,在激波管实测实验中,压力传感器阶跃响应信号中往往包含大量多频段的复杂噪声成分,并且第1峰值时间和振荡周期的估计精度也受采样频率的影响,导致激波管反射阶跃压力上升时间的估计精度较低。

基于此,本文通过结合经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和衰减正弦拟合,提出一种激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计方法。采用经验模态分解对压力传感器阶跃响应信号进行处理,消除大量噪声成分和低频趋势成分。通过分别对阶跃响应信号的初始上升段和正弦振荡段进行衰减正弦拟合,弥补了阶跃响应信号采样率不足对第1峰值时间和振荡周期估计精度的影响,实现激波管反射阶跃压力上升时间的高精度估计。

1 激波管反射阶跃压力产生原理

激波管由高压室和低压室组成,由膜片隔开,如图1所示。在激波管工作时,向高压室充入气体,当两个腔室压力差达到膜片可承受最大压力时膜片破裂。膜片破裂后高压室气体向低压室流动,形成入射激波^[11]。入射激

波运动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(通常 $<1\ \mu\text{s}$),表现为阶跃压力形式,称为反射阶跃压力。

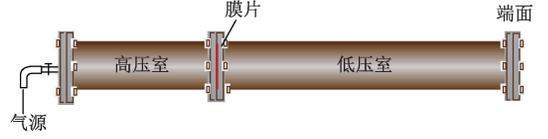


图1 激波管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shock tube

2 激波管反射阶跃压力上升时间估计方法

由于激波管反射阶跃压力上升时间通常小于 $1\ \mu\text{s}$,常用的压力传感器无法实现直接测量,因此本文通过在激波管端面安装压力传感器,根据压力传感器阶跃响应特性,建立反射阶跃压力上升时间估计理论模型,并结合经验模态分解和衰减正弦拟合方法,有效减小信号噪声和采样率不足对阶跃压力上升时间估计精度的影响,具体估计过程如下。

2.1 激波管反射阶跃压力上升时间估计方法

压力传感器一般可看作二阶线性时不变系统,其传递函数表示为^[10]:

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{\omega_1\omega_2}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)} \quad (1)$$

式中: ζ 为阻尼比; ω_n 为谐振频率; $\omega_1 = \zeta\omega_n + i\omega_d$, $\omega_2 = \zeta\omega_n - i\omega_d$, $\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n$ 。

激波管反射阶跃压力信号的拉氏变换为:

$$X(s) = (1 - e^{-Ts})/Ts^2 \quad (2)$$

式中: T 为反射阶跃压力上升时间。因此,系统的阶跃压力响应信号为:

$$Y(s) = X(s)H(s) = \frac{\omega_1\omega_2(1 - e^{-Ts})}{Ts^2(s + \omega_1)(s + \omega_2)} \quad (3)$$

式(3)的拉氏反变换为 $y(t)$,对 $y(t)$ 求导得到:

$$y'(t) = \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{T\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin\omega_d \left[t - \left(\frac{T}{2} + \frac{\varphi - \phi}{\omega_d} \right) \right] \quad (4)$$

式中: $\omega_d = 2\pi/T_d$, T_d 为阶跃响应信号振荡周期; $\varphi =$

$$\arcsin\zeta, \phi = \arctan \frac{(e^{\zeta\omega_n T} - 1) \cos \frac{\omega_d T}{2}}{(e^{\zeta\omega_n T} + 1) \sin \frac{\omega_d T}{2}}$$

$$\text{令 } y'(t) = 0, \text{ 得到 } \sin\omega_d \left[t - \left(\frac{T}{2} + \frac{\varphi - \phi}{\omega_d} \right) \right] = 0,$$

即:

$$\frac{1}{T_d} \left[2t - T - 2 \frac{\varphi - \phi}{\omega_d} \right] = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

式(5)为0表示阶跃响应上升初始点,为1表示第1个极大值点。假设第1个极大值对应的时间为 t_1 (称为第1峰值时间),则:

$$T = 2t_1 - T_d - 2 \frac{\varphi - \phi}{\omega_d} \quad (6)$$

在压力传感器的动态校准中通常有 $\zeta \ll 1$ 和 $T \ll T_d$,

此时 $\left| 2 \frac{\varphi - \phi}{\omega_d} \right| \ll T$, 激波管反射阶跃压力上升时间估计模型可简化为:

$$T = 2t_1 - T_d \quad (7)$$

阶跃压力信号与压力传感器阶跃响应信号的关系如图2所示。

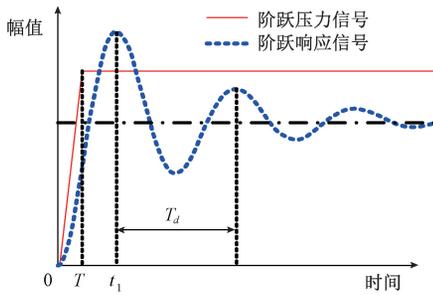


图2 阶跃压力与阶跃响应的关系示意图

Fig. 2 Relationship between step pressure and step response

从式(7)估计模型可知,在满足 $\zeta \ll 1$ 和 $T \ll T_d$ 条件下,激波管反射阶跃压力上升时间的估计精度取决于压力传感器阶跃响应信号第1峰值时间 t_1 和振荡周期 T_d 的估计精度。然而在实际激波管实验中, t_1 和 T_d 的估计结果受信号噪声和采样率不足等因素影响,导致反射阶跃压力上升时间 T 的估计误差较大。因此,本文通过结合经验模态分解和衰减正弦拟合,减小信号噪声和采样率不足的影响,提高激波管反射阶跃压力上升时间估计精度。

2.2 基于EMD的阶跃响应信号预处理

为了减小信号噪声对阶跃压力上升时间估计的影响,采用EMD对压力传感器阶跃响应信号 $y(t)$ 进行自适应分解,得到 m 个本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量和1个残余分量 $r(t)$ ^[12-15],表示为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^m \text{IMF}_i(t) + r(t) \quad (8)$$

IMF分量的频率由高到低分布,通过分析IMFs频谱分布及其与 $y(t)$ 的相关系数(correlation coefficient, CC)和平均绝对误差百分比(mean absolute percentage error, MAPE),识别噪声IMF分量,实现阶跃响应信号预处理,提取阶跃响应信号中的衰减振铃分量。CC和MAPE的

定义如下^[16]:

$$CC(i) = \frac{\sum_{n=1}^N (y(n) - \bar{y}(n))(c_i(n) - \bar{c}_i(n))}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (y(n) - \bar{y}(n))^2 \sum_{n=1}^N (c_i(n) - \bar{c}_i(n))^2}} \quad (9)$$

$$MAPE(i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{y(n) - c_i(n) - r(n)}{y(n)} \right| \quad (10)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$,表示 m 个IMF分量; $y(n)$ 和 $c_i(n)$ 表示阶跃响应信号和第 i 个IMF对应的离散信号; $\bar{y}(n)$ 和 $\bar{c}_i(n)$ 分别表示 $y(n)$ 和 $c_i(n)$ 的平均值; N 为信号长度。

$CC \in [0, 1]$, CC 越小且MAPE值越大,表明该IMF分量与 $y(n)$ 的相关性越差,此时IMF分量可识别为噪声分量,予以剔除;对余下IMF分量进行重构,即可得到噪声消除且去趋势的阶跃响应信号预处理结果,称为阶跃响应信号的衰减振铃分量 $y_{ar}(n)$ 。

2.3 第1峰值时间与振荡周期估计

由于在根据 $y_{ar}(n)$ 直接估计第1峰值时间和振荡周期时,受信号采样率不足的影响,导致第1峰值时间和振荡周期的估计结果与实际值之间存在偏差,如图3所示,进而会降低阶跃压力上升时间的估计精度。

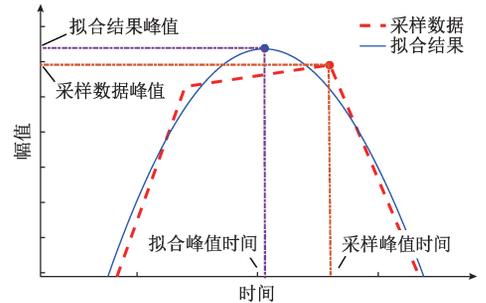


图3 采样率不足对第1峰值时间估计的影响示意图
Fig. 3 Influence of insufficient sampling on the first peak time estimation

针对上述问题,本文通过对 $y_{ar}(n)$ 进行衰减正弦拟合,弥补采样率不足的影响。根据二阶线性时不变系统的阶跃响应信号特点^[17-18],可知去噪后的阶跃响应信号的衰减振铃分量 $y_{ar}(n)$ 由指数衰减分量 $y_a(n)$ 和正弦振荡分量 $y_r(n)$ 组成,即:

$$y_{ar}(n) = y_a(n) y_r(n) \quad (11)$$

$$y_a(n) = v e^{-kn} \quad (12)$$

$$y_r(n) = a_r \sin(\omega_r n + b_r) \quad (13)$$

式中: v 为衰减系数; k 为衰减因子; a_r 为振荡幅值; ω_r 为振荡角频率; b_r 为相位。

由于受阶跃压力的瞬间冲激作用,压力传感器阶跃响应信号的初始上升沿出现较大的幅值突变现象,当直接采用 $y_r(n)$ 对阶跃响应的正弦振荡进行拟合时,会出现初始上升沿拟合误差大,进而增大第1峰值时间的估

计误差。为了减小该影响,本文将初始上升段与第 1 峰值时间之后的正弦振荡段分别进行正弦拟合,因此 $y_r(n)$ 可表示为分段函数如下:

$$y_r(n) = \begin{cases} y_{r1}(n) = a_{r1} \sin(\omega_{r1}n + b_{r1}), & 1 \leq n \leq t_r f_s \\ y_{r2}(n) = a_{r2} \sin(\omega_{r2}n + b_{r2}), & n > t_r f_s \end{cases} \quad (14)$$

式中: f_s 为采样频率,其他参数定义同式(13)。

衰减振铃分量 $y_{ar}(n)$ 的拟合步骤如下。

步骤 1) 提取 $y_{ar}(n)$ 中振荡区间内的所有极大值点,基于最小二乘拟合^[19] 估计指数衰减分量 $y_a(n)$ 中的参数 v 和 k , 得到指数衰减函数。

步骤 2) 根据阶跃响应信号的采样频率对指数衰减函数进行重采样,得到 $y_a(n)$ 。

步骤 3) 通过计算 $y_{ar}(n) - y_a(n)$, 剔除指数衰减趋势,得到正弦振荡分量 $y_r(n)$ 。

步骤 4) 对 $y_r(n)$ 中初始上升段 $y_{r1}(n)$ 和正弦振荡段 $y_{r2}(n)$ 分别进行正弦拟合。

步骤 5) 分别根据 $y_{r1}(n)$ 和 $y_{r2}(n)$ 拟合结果估计第 1 峰值时间 t_1 和振荡周期 T_d , 并通过式(7) 得到激波管反射阶跃压力上升时间的估计结果。

3 仿真实验分析

3.1 阶跃压力上升时间估计仿真实验

采用 MATLAB 软件模拟二阶线性时不变系统,其中采样频率、阻尼比和谐振频率分别设置为 $f_s = 5 \text{ MHz}$ 、 $\zeta = 0.006$ 和 $\omega_n = 0.3 \text{ MHz}$ 。仿真生成上升时间 $T = 0.6 \mu\text{s}$ 的单位阶跃压力信号,进而得到二阶系统的阶跃响应信号,其中信号长度为 $N = 1000$ 。为了模拟实际阶跃响应信号,采用“wnoise”函数生成 Bumps 信号模拟噪声信号^[20],信号长度与阶跃响应信号长度相同。无噪声阶跃响应信号、噪声信号以及含噪阶跃响应信号信噪比(SNR)为 11.3 dB 如图 4 所示。

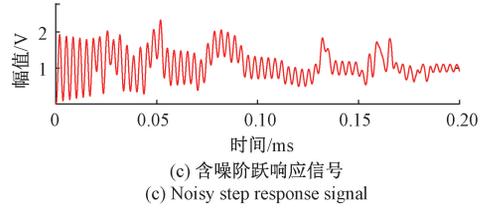
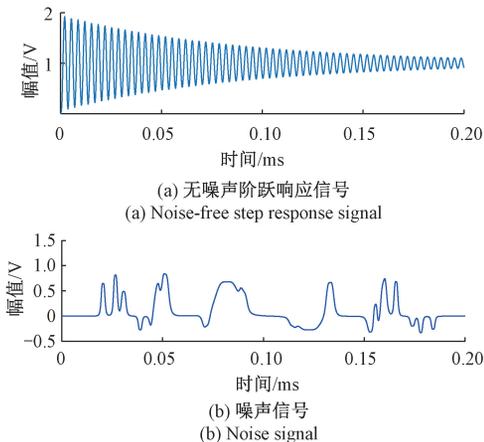


图 4 仿真信号

Fig. 4 The simulation signals

对含噪阶跃响应信号进行 EMD 分解,得到 5 个 IMF 分量和 1 个残余分量,如图 5 所示。为了从 IMF 分量中判别衰减振铃分量,计算各 IMF 与含噪阶跃响应信号之间的 CC 和 $MAPE$,结果如表 1 所示。

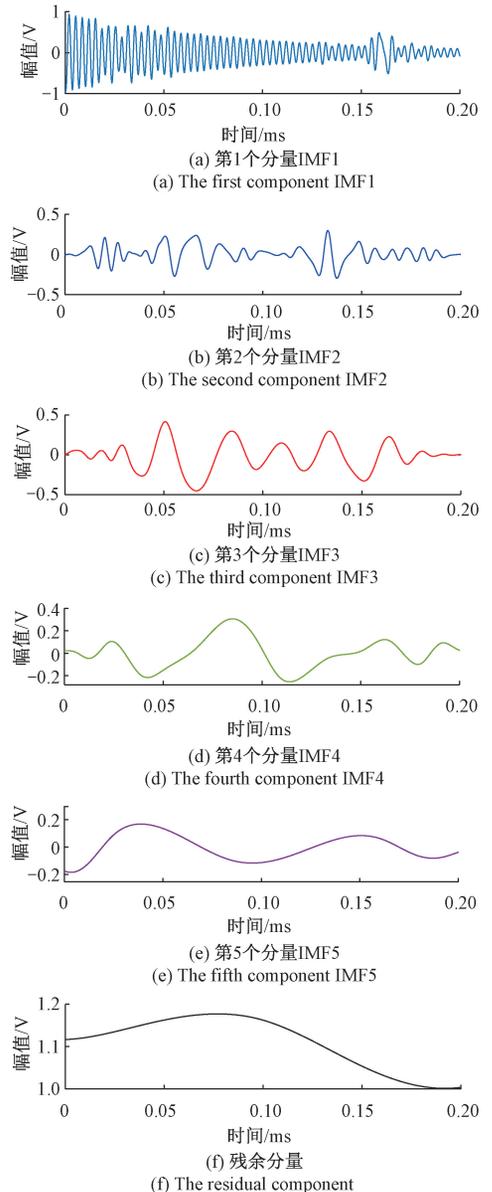


图 5 含噪阶跃响应信号分解结果

Fig. 5 Decomposition results of noisy step response signal

表1 衰减振铃分量判别

Table 1 Discrimination of attenuated ringing components

指标	CC	MAPE/%	是否为衰减振铃分量
IMF1	0.79	5.37	是
IMF2	0.24	36.12	否
IMF3	0.39	36.16	否
IMF4	0.30	36.96	否
IMF5	0.09	30.65	否

由表1可以看出,IMF1与含噪阶跃响应信号的相关系数为0.79,而其他IMF分量与含噪阶跃响应信号的相关系数均小于0.4,远小于0.79。并且IMF1与含噪阶跃响应信号之间的MAPE值为5.37%,其余IMF分量的

MAPE数值均大于30%。根据两个指标结果可判断出IMF1包含大部分振铃成分,因此IMF1为衰减振铃分量,其余IMF分量为噪声分量,予以剔除。

从图5可以看出,IMF1在0.15 ms之后出现模态混叠,导致严重的信号畸变。为了消除模态混叠现象对指数衰减分量拟合精度的影响,实验选取0.15 ms之前的数据进行拟合。对IMF1在0.15 ms之前时间区间内的所有极大值点,采用最小二乘拟合得到衰减指数函数,如图6(a)所示。对衰减指数函数依据采样时间间隔重采样,并将重采样后的衰减指数分量从IMF1中剔除,即可得到正弦振荡分量。分别在 $[0 \mu\text{s}, 3.6 \mu\text{s}]$ 和 $(3.6 \mu\text{s}, 0.15 \text{ ms}]$ 时间区间内对初始上升段和正弦振荡段进行正弦拟合,拟合结果分别如图6(b)和(c)所示。

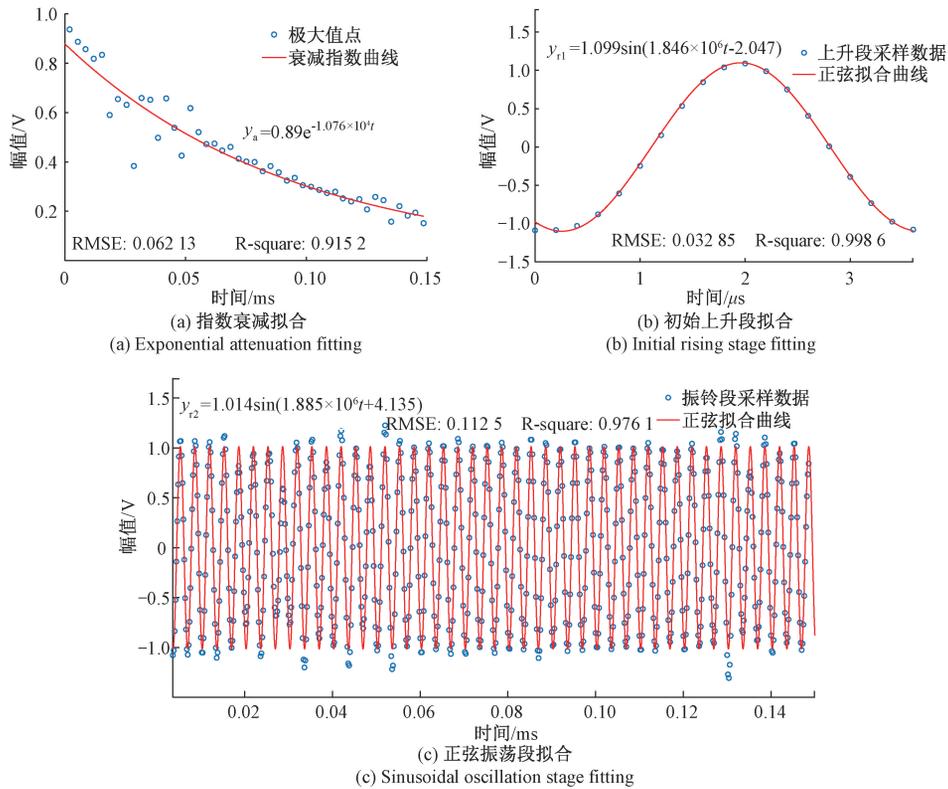


图6 衰减正弦拟合结果

Fig. 6 Attenuation sine fitting results

上升段拟合函数为 $y_{r1} = 1.099 \sin(1.846 \times 10^6 t - 2.047)$, 求导并令 $y'_{r1} = 0$, 得到第1峰值时间为 $t_1 = 1.96 \mu\text{s}$ 。振荡段拟合函数为 $y_{r2} = 1.014 \sin(1.885 \times 10^6 t + 4.135)$, 振荡角频率 $\omega = 1.885 \times 10^6$, 振荡周期 $T_d = 2\pi/\omega = 3.33 \mu\text{s}$ 。反射阶跃压力上升时间估计值为 $T = 2t_1 - T_d = 0.587 \mu\text{s}$, 估计误差为 $0.013 \mu\text{s}$, 相对误差为 2.17%。

3.2 系统参数对阶跃压力上升时间估计精度的影响

为验证本文方法在不同系统参数下对上升时间的估计精度,在不同噪声下进行4组仿真实验,4组实验中阶跃响应信号的SNR分别为9.4、11.3、14.0和17.3 dB。二阶系统谐振频率的取值范围为0.28~3.2 MHz,取值间隔为2 kHz;阻尼比的取值范围为0.001~0.01,取值间隔为0.001。采用本文方法得到实验中阶跃压力上升时间估计相对误差如图7所示。

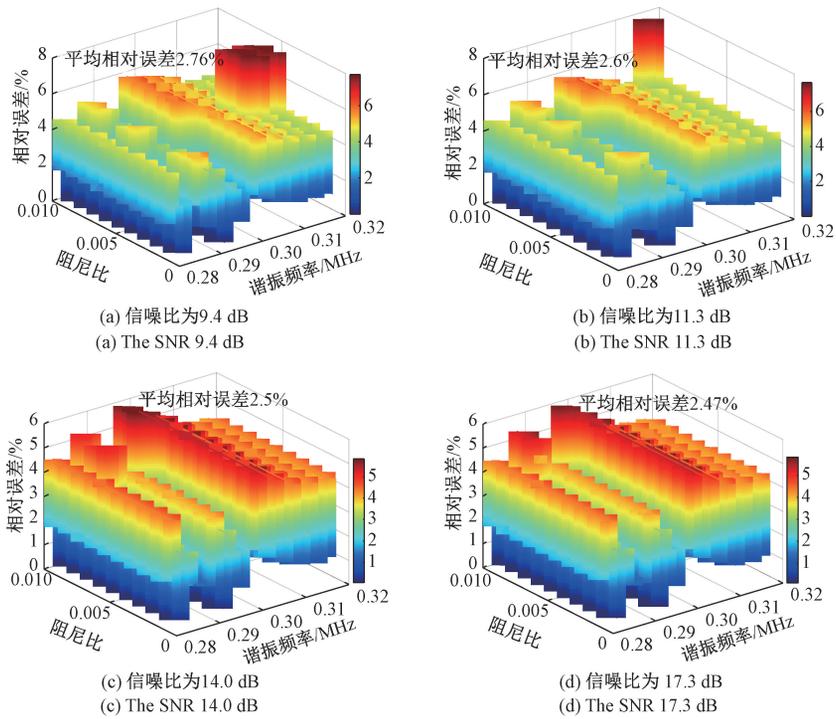


图 7 不同噪声下系统参数对阶跃压力上升时间估计的影响

Fig. 7 Influence of system parameters on step pressure rise time estimation under different noise conditions

从图 7 可以看出,随着含噪阶跃响应信号信噪比的增大(即噪声成分减少),阶跃压力上升时间估计平均相对误差减小。此外,随着谐振频率和阻尼比的变化,阶跃压力上升时间估计结果的相对误差存在一定的波动,4 组实验平均相对误差分别为 2.76%、2.60%、2.50% 和 1.47%,最大平均相对误差均小于 8%。该结果表明本文方法通过引入基于 EMD 的信号预处理,可以很好地避免噪声对阶跃压力上升时间估计的影响,并且传感器系统谐振频率和阻尼比的变化对阶跃压力上升时间估计精度的影响较小。

3.3 对比分析

为了验证本文方法对于激波管反射阶跃压力上升时间估计的优越性,仿真不同上升时间的阶跃压力信号进行实验,二阶系统的阻尼比和谐振频率分别为 0.006 和 0.3 MHz,采样频率为 5 MHz。此处需要说明,当反射阶跃压力上升时间小于采样间隔(即 0.2 μs)时,无法模拟完整阶跃压力信号,导致系统阶跃响应信号失真。因此,实验生成的阶跃压力上升时间变化范围为 0.3~1 μs,取值间隔为 0.1 μs。分别采用传统方法、直接拟合法(即直接对含噪阶跃响应信号进行衰减正弦拟合)和本文方法对阶跃压力上升时间进行估计,得到 3 种方法估计结果的相对误差如表 2 所示。

表 2 阶跃压力上升时间估计相对误差对比

Table 2 Comparison of estimation relative error of step pressure rise time

阶跃压力 上升时间/μs	传统方法/%	直接拟合 方法/%	本文方法/%
0.3	29.94	15.10	2.11
0.4	47.46	3.75	3.41
0.5	22.03	1.20	1.33
0.6	1.69	2.39	2.17
0.7	12.83	0.86	1.00
0.8	23.73	6.79	1.62
0.9	12.24	3.74	3.63
1.0	1.02	5.43	5.27
平均相对误差/%	18.87	4.91	2.57

从表 2 可以看出,传统方法受信号噪声和采样率不足的影响,其对阶跃压力上升时间估计的平均相对误差最大(18.87%);通过引入衰减正弦拟合,直接拟合法的上升时间估计平均相对误差为 4.91%,估计精度相比于传统方法有明显提升,其原因在于通过数据拟合可以有效减小采样率不足对上升时间估计的影响;对于本文方法,由于结合了 EMD 和衰减正弦拟合,可同时减小噪声和采样率不足的影响,得到的阶跃压力上升时间估计平均相对误差最小,仅为 2.57%。

4 激波管实测实验

本实验将两个 8510B-200 压阻式压力传感器 (S1 和 S2) 对称安装在激波管端面进行实验, 两组实验采用的铝膜片厚度 d 分别为 0.07 和 0.25 mm, 数据采集的采样频率均为 5 MHz, 得到压力传感器阶跃响应信号如图 8 所示。

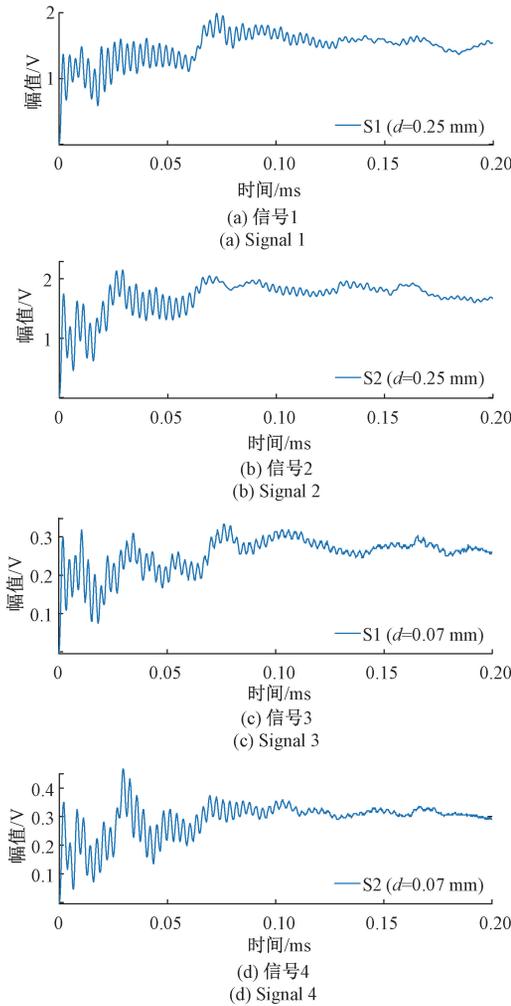


图 8 压力传感器阶跃响应信号

Fig. 8 Step response signals of pressure sensors

4 个信号经 EMD 分解后提取得到的衰减振铃分量如图 9 所示。由于实测阶跃响应信号中包含的噪声分量复杂, 幅值较大, 可以看出衰减振铃分量在某些时间段内出现振铃成分缺失现象, 尤其是信号 3, 在大约 0.03 ms 之后无振铃成分。

为了识别振铃分量衰减过程的最优分析区间, 将衰减振铃分量等分为 10 个区间, 区间宽度为 0.2 ms, 每个区间内信号频谱在振铃频率处的归一化幅值如图 10 所

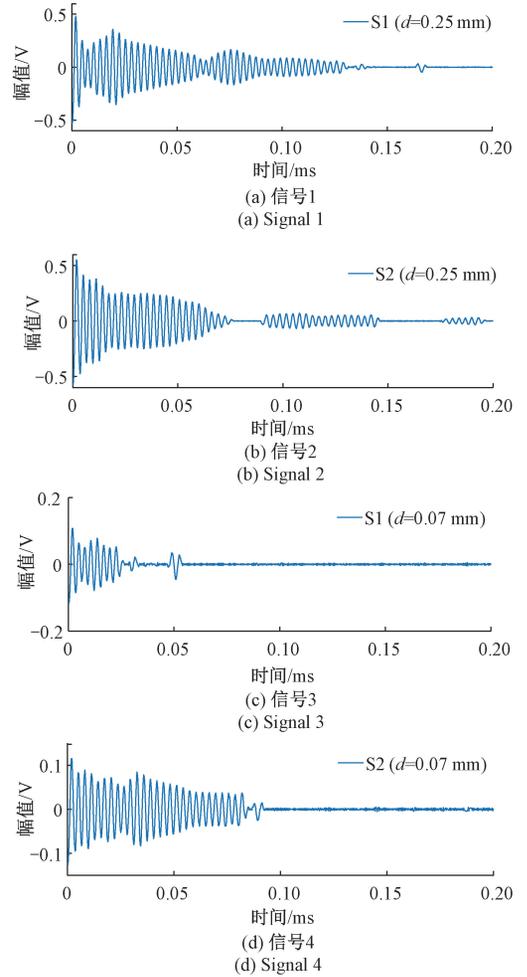


图 9 衰减振铃分量

Fig. 9 The attenuation ringing components

示。可以看出对于信号 1, 在第 8 个时间区间内的振铃幅值约为 0, 因此选取前 7 个时间区间为分析区间, 即 (0 ms, 0.14 ms]; 同理, 对于信号 2、信号 3 和信号 4, 分别取 (0 ms, 0.16 ms]、(0 ms, 0.06 ms] 和 (0 ms, 0.1 ms] 为分析区间。

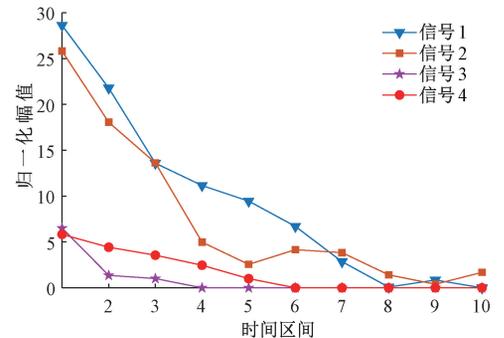


图 10 各衰减振铃分量在各子区间的振铃幅值
Fig. 10 Ringing amplitudes of each attenuation ring component in each sub-interval

针对4个阶跃响应信号,使用传统方法和本文方法估计激波管反射阶跃压力上升时间,结果如表3所示。可知传统方法计算得到的激波管反射阶跃压力上升时间均 $>1\ \mu\text{s}$,与激波管反射阶跃压力上升时间 $<1\ \mu\text{s}$ 的实际情况不符。而本文方法估计得到的反射阶跃压力上升时间均 $<1\ \mu\text{s}$ 。并且在相同膜片厚

度的实验条件下,采用传统方法对两个阶跃响应信号计算得到的反射阶跃压力上升时间的相对误差分别为7.5%和4.3%,均大于本文方法得到的相对误差,分别为0.14%和1.9%。该结果证实了本文方法在激波管反射阶跃压力上升时间估计中具有更强的鲁棒性。

表3 反射阶跃压力上升时间估计结果

Table 3 Estimation results of reflection step pressure rise time

估计结果	$d=0.25\ \text{mm}$			$d=0.07\ \text{mm}$		
	信号1结果/ μs	信号2结果/ μs	相对误差/%	信号3结果/ μs	信号4结果/ μs	相对误差/%
传统方法	1.251	1.162	7.5	2.074	2.163	4.3
本文方法	0.711	0.712	0.14	0.867	0.884	1.9

5 结 论

本文基于经验模态分解和衰减正弦拟合,提出了一种激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计方法,通过仿真实验和激波管实测实验可知,采用经验模态分解对压力传感器阶跃响应信号进行预处理,可以有效减小信号噪声对阶跃压力上升时间估计的影响,并且通过衰减正弦拟合,弥补了采样率不足引入的估计误差,实现了激波管反射阶跃压力上升时间的高精度估计。仿真实验结果表明,在不同实验条件下本文方法的估计平均相对误差2.57%,远小于传统方法(18.87%)和衰减正弦拟合方法的平均相对误差(4.91%)。分析了二阶系统阻尼比、谐振频率和噪声成分对本文方法估计精度的影响,结果表明在不同条件下阶跃压力上升时间估计平均相对误差均在2.5%左右,最大相对误差小于8%。激波管实测实验结果表明,在采用厚度分别为0.25和0.07 mm铝膜片的情况下,本文方法对于反射阶跃压力上升时间估计的平均值分别为0.712和0.876 μs ,同时测量结果之间的相对误差分别为0.14%和1.9%,而传统方法同时测量结果的相对误差分别为7.5%和4.3%,验证了本文方法对于激波管反射阶跃压力上升时间估计的鲁棒性。

参考文献

[1] SVETE A, KUTIN J. Identifying the high-frequency response of a piezoelectric pressure measurement system using a shock tube primary method [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 162: 108014.

[2] 杨军, 张力, 李新良. 动态计量技术发展中的几个关键问题[J]. *计测技术*, 2021, 41(2): 8-21.

YANG J, ZHANG L, LI X L. Several primary problems in the development of dynamic metrology [J]. *Metrology*

& Measurement Technology, 2021, 41(2): 8-21.

[3] 姚贞建. 基于激波管的压力传感器动态校准研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2018.

YAO ZH J. Research on dynamic calibration of pressure sensors based on shock tube [D]. Beijing: Beihang University, 2018.

[4] 杨兆欣, 顾正华, 张文清, 等. 基于激波原理的气体动态温度校准装置研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(5): 23-31.

YANG ZH X, GU ZH H, ZHANG W Q, et al. Research on gas dynamic temperature calibration device based on shock wave principle [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(5): 23-31.

[5] ISA-37.16.01-2002. A Guide for the dynamic calibration of pressure transducers[S]. USA: 2002.

[6] JJG 624—2005. 动态压力传感器检定规程[S]. 2005.

JJG 624—2005. Verification regulation of dynamic pressure transducers[S]. 2005.

[7] DOWNES S, KNOTT A, ROBINSON L. Towards a shock tube method for the dynamic calibration of pressure sensors [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2014, 372: 20130299.

[8] 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.

[9] 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.

YANG J, XUE B. Effects of shock tube length on step pressure waveform [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(3): 252-257.

[10] 杨军, 李刚, 李程, 等. 阶跃信号测量中的上升时间

- 计算[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 169-173.
 YANG J, LI G, LI CH, et al. Calculating of rising time in the measurement of step signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6): 169-173.
- [11] 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.
- [12] 殷逸冰, 文振华. 基于模态分量优化重构和稀疏表达的静电信号联合降噪方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 196-204.
 YIN Y B, WEN ZH H. Joint denoising method of electrostatic signal based on modal component optimization and sparse representation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 196-204.
- [13] 王利福, 刘屹江泽, 王焱增. 基于 EEMD 能量矩与 ISSA-SVM 算法的 GIS 局部放电类型识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 204-212.
 WANG L F, LIU Y J Z, WANG Y Z. Partial discharge identification method in GIS based on EEMD energy moment and ISSA-SVM algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 204-212.
- [14] 姚贞建, 王中宇, 王辰辰, 等. 压力传感器动态特性参数不确定度评定[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(8): 1672-1681.
 YAO ZH J, WANG ZH Y, WANG CH CH, et al. Uncertainty evaluation for dynamic characteristic parameters of pressure sensors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(8): 1672-1681.
- [15] 徐伟, 夏志祥, 行鸿彦. 基于集成经验模态分解和极端梯度提升的雷电预警方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 235-243.
 XU W, XIA ZH X, XING H Y. Lightning warning method based on EEMD and XGBoost [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 235-243.
- [16] 刘若汐, 饶家声, 魏瑞晗, 等. 恒河猴表面肌电信号小波去噪的复合评价指标[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(9): 1169-1174.
 LIU R X, RAO J SH, WEI R H, et al. A composite evaluation indicator of wavelet denoising in surface electromyography of rhesus monkey[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(9): 1169-1174.
- [17] 冯晓伟, 李正生. 高速衰减正弦信号的采样及曲线拟合方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(10): 75-78.
 FENG X W, LI ZH SH. Method on sampling and curve fitting of high speed damped sine wave [J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(10): 75-78.
- [18] 龙礼, 黄家才. 基于递推最小二乘法的地磁测量误差校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1440-1446.
 LONG L, HUANG J C. Recursive least square based online error calibration method in geomagnetic detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1440-1446.
- [19] 梁志国. 非均匀采样条件下残周期正弦波形的最小二乘拟合算法[J]. 计量学报, 2021, 42(3): 358-364.
 LIANG ZH G. The sinewave fit algorithm based on total least-square method with partial period waveforms and non-uniform sampling [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(3): 358-364.
- [20] YAO Z, LIU X, YANG W, et al. A coarse-to-fine denoising method for dynamic calibration signals of pressure sensor based on adaptive mode decompositions [J]. Measurement, 2020, 163: 107935.

作者简介



李永生, 2021 年于安徽建筑大学获得学士学位, 现为武汉工程大学硕士研究生, 主要研究方向为激波管动态压力溯源与重构方法。

E-mail: liyongsheng202102@163.com

Li Yongsheng received his B. Sc. degree from Anhui Jianzhu University in 2021. He is currently a master student at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include dynamic pressure traceable measurement and reconstruction method in shock tube.



姚贞建 (通信作者), 2013 年于燕山大学获得学士学位, 2018 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为武汉工程大学讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为激波管动态压力测试计量与信号处理方法。

E-mail: yao_buaa@126.com

Yao Zhenjian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yanshan University in 2013, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2018. He is currently a lecturer and a master advisor at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include dynamic pressure measurement in shock tube and signal processing technologies.