

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.01.11

噪声对阶跃信号上升时间测量不确定度的影响

陈晓松, 李峰, 李天然

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了更准确地反映阶跃信号上升时间测量过程中可能存在的不确定度来源、提高测量结果的可信度, 对噪声引入的阶跃信号上升时间测量不确定度分量开展了数值仿真和试验分析。结果表明, 信噪比对上升时间测量不确定度存在显著影响, 在信噪比较低的情况下, 噪声引起的上升时间测量不确定度成为主要来源。通过比较 Savitzky-Golay 平滑算法和移动平均平滑算法在阶跃信号上升时间计算中的应用效果, 发现采用适当的平滑算法可以降低噪声引入的不确定度分量, 其中, 移动平均平滑算法的效果更好。本研究有助于提高动态信号测量结果的可靠性和准确性, 对航空、航天、汽车等领域的动态信号测试不确定度分析具有重要的参考价值。

关键词: 上升时间; 测量不确定度; 噪声; 阶跃信号; 校准; 测试方法

中图分类号: TB95; TH701; V242 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2024) 01-0107-08

The impact of noise on the measurement uncertainty of step signal rise time

CHEN Xiaosong, LI Feng, LI Tianran

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

Abstract: In order to more accurately reflect the sources of uncertainty in the measurement process of the rise time of step signals and improve the credibility of measurement results, numerical simulations and experimental analyses were conducted on the uncertainty components of step signal rise time measurement introduced by noise. The results indicate that the signal-to-noise ratio significantly influences the uncertainty of rise time measurements. In situations with low signal-to-noise ratio, the uncertainty in rise time measurements caused by noise becomes the main source. By comparing the application effects of the Savitzky-Golay smoothing algorithm and the moving average smoothing algorithm in the calculation of rise time for step signals, it was found that the use of an appropriate smoothing algorithm can reduce the uncertainty components introduced by noise, with the moving average smoothing algorithm showing better performance. This study contributes to improving the reliability and accuracy of dynamic signal measurement results, and is of significant reference value for uncertainty analysis in dynamic signal testing in the fields such as aviation, aerospace, and automotive industries.

Key words: rise time; measurement uncertainty; noise; step signal; calibration; test method

0 引言

阶跃信号是一种在计量测试领域中广泛使用的瞬态信号类型, 因其工程实现手段丰富而备受

青睐, 如激波管产生的阶跃压力可实现对压力测试设备的校准、热风洞产生负阶跃温度可实现对测温系统动态响应的校准等。上升时间是使用阶跃信号开展校准测试时最受关注的参数之一, 可

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目 (JSJL2020205A002)

引用格式: 陈晓松, 李峰, 李天然. 噪声对阶跃信号上升时间测量不确定度的影响[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 107-114.

Citation: CHEN X S, LI F, LI T R. The impact of noise on the measurement uncertainty of step signal rise time [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 107-114.



直接反映系统的动态响应，其测试的准确性对仪器设备动态性能的评价具有直接影响。因此，研究人员就阶跃信号上升时间测试方法及不确定度方面开展了广泛的研究。以上升时间的测量模型来分类，其主要分为两种：①将上升时间的测试模型视为2个时刻的差，对2个时刻读取时的不确定度来源进行分析，如中北大学郝晓剑等人搭建的基于半导体激光器的热电偶时间常数测试系统，其上升时间测试不确定度的评定同时考虑了热电偶输出时刻分辨力引入的不确定度以及重复性引入的不确定度^[1-2]。②将阶跃信号的上升过程简化为线性的，上升时间通过阶跃后平台与前平台计算得到，这种测量模型将阶跃压力前后平台测试结果的准确性纳入到不确定度评定的来源中^[3-5]，如对数字示波器的不确定度评定中，通常将示波器幅值测量不确定度和时间分辨力作为不确定度的来源^[6-7]。此外，部分研究对上升时间的新测试模型或计算方法进行了探索：北京长城计量测试技术研究所杨军等人^[8]将阶跃信号的上升过程看作二阶单自由度系统斜台响应，建立了第一峰值时间、振荡周期与斜台上升时间的数学关系，并在激波管上进行了验证；北京长城计量测试技术研究所李永生等人^[9]将传感器视作二阶线性时不变系统，基于经验模态分解和衰减正弦拟合，提出了激波管反射阶跃压力上升时间的高精度估计方法。

在科学研究和实际工程中，各种来源的噪声都可能对阶跃信号测量产生不可忽视的影响。电路中的电磁干扰、传感器本身的噪声、环境因素等都可能引入额外的波动，使信号测量结果产生偏差。如中国计量院对触针式表面粗糙度测量仪进行了低噪声优化设计，将系统内的静态噪声水平作为不确定度来源之一^[10]。考虑到噪声对计量测试的影响，研究人员就降噪的算法及试验中的信号调理对校准测试结果的影响也展开了一些研究^[11-13]，获取了信号调理仪、数字均值滤波器等引入的不确定度分量。

现有的阶跃信号上升时间测量不确定度评定大多基于理想条件下的模型^[14-15]，忽略了实际测量环境中存在的噪声。本文针对噪声对阶跃信号上升时间测量不确定度的影响展开研究，通过数值仿真构建含有噪声的阶跃信号，计算不同信噪比

下斜台信号上升时间的仿真测量结果，结合统计方法计算噪声引入的不确定度分量，并对不同降噪算法所起的效果进行了比较，最终在快开阀阶跃压力测试系统中进行了试验验证。

1 阶跃信号上升时间测量方法

使用阶跃信号实现上升时间测试的对象众多，上升时间的计算方法基本相同。这里以阶跃压力上升时间的响应曲线为例，根据JJG 624-2005《动态压力传感器检定规程》的定义，阶跃压力的上升时间 t_r 是指被测系统被激励时，响应值从阶跃幅值 \bar{u} 的10%过渡到90%所需的时间，如图1所示。其计算式为

$$t_r = t_{90} - t_{10} \quad (1)$$

式中： t_{90} 为信号上升到响应幅值的90%的时刻， t_{10} 为信号上升响应幅值的10%的时刻。

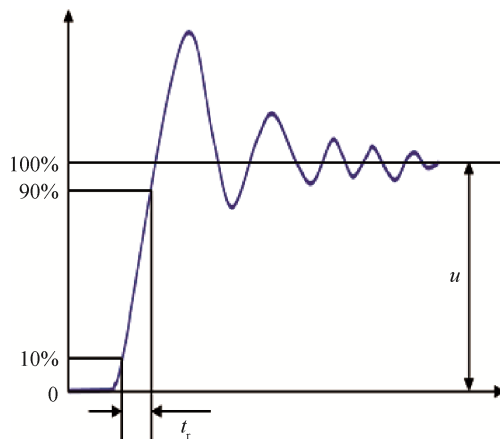


图1 理想阶跃信号上升时间计算方法示意图
Fig.1 Schematic diagram of method for calculating the rise time of ideal step signal

在实际测试中，测得的阶跃压力响应曲线往往含有噪声，因此，读取时间时会受到噪声带来的影响，无法获得准确的 t_{10} 及 t_{90} 。在目前的校准测试中，通常选取第一个超过响应幅值10%的时刻为 t_{10} ，第一个超过响应幅值的90%的时刻为 t_{90} ，如图2所示。

2 仿真分析

通过数值仿真的方法可以方便地进行单一影响因素的分析，避免产生实际试验中标准器、传感器、调理仪等设备引入的不确定度。本节将通

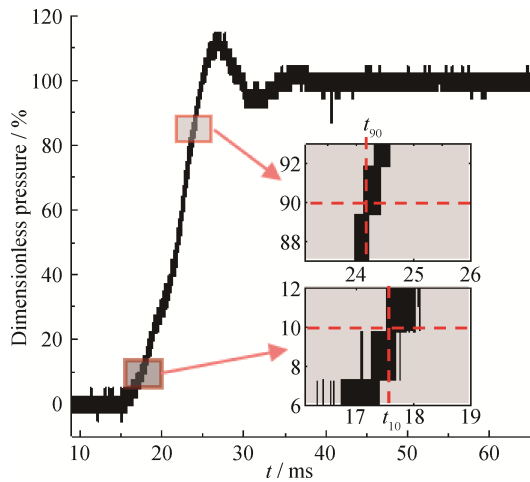


图2 实际阶跃信号上升时间测试方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of actual step signal rise time test method

过数值仿真分析量化噪声引入的不确定度。

2.1 仿真试验的实现

首先需要设计阶跃信号，将阶跃信号简化为线性系统，按照式(2)构建斜台上升过程

$$y = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ \frac{1}{t_1 - t_0} \cdot (t - t_0), & t_0 \leq t < t_1 \\ 1, & t_1 \leq t \end{cases} \quad (2)$$

式中： t_0 为阶跃信号开始上升的时刻， t_1 为阶跃信号达到后平台的时刻。

在数值仿真时，斜台的斜率会对上升过程中噪声带的形状乃至最终的仿真试验结果造成影响，将斜台上升过程的时间间隔与采样的时间间隔之间的比值取为无量纲参数 K_t ，使仿真分析更具普适性

$$K_t = \log \frac{t_1 - t_0}{1/f} \quad (3)$$

式中： f 为采样频率。

对同一标准斜台信号，叠加一个已知的噪声信号，可模拟实际试验中采集到的离散序列，噪声信号由服从正态分布($\mu_0 = 0$ 、 $\sigma_0 = 1$)的随机序列与需要的幅值之积构成。信噪比(Signal-to-noise Ratio, S_{NR})通过式(4)计算

$$S_{NR} = 20 \log \frac{A_s}{A_N} \quad (4)$$

式中： A_s 为阶跃信号幅值，即阶跃信号前后平台的差值， A_N 为噪声信号幅值。

对构建的已知信号读取上升时间，使用同一

标准斜台信号叠加相同分布函数的随机噪声进行多次仿真试验，使用统计方法拟合仿真测试结果的分布曲线，可计算出仿真试验中上升时间的测量结果和不确定度，该不确定度完全由给定信噪比下的噪声引起。

图3为 $S_{NR} = 40$ 、 $K_t = 3$ 时，5000组仿真试验计算得到的上升时间 t_r 的分布情况。 $K_t = 3$ 时，该标准斜台可以看作使用1 MHz采样率、对真实上升时间为0.8 ms的阶跃信号的仿真试验。经分布拟合， t_r 基本服从正态分布的特征，其位置参数 $\mu = 0.8$ ms，尺寸参数 $\sigma = 8.2 \mu s$ 。根据GB/T 27418-2017《测量不确定度评定和表示》，标准不确定度的A类评定可根据统计分析的方法来进行，则其相对扩展不确定度可由式(5)计算，得到95%置信率的相对扩展度 $U_{95rel} = 2\%$ 。

$$U_{95rel} = \frac{k_{95} \cdot \sigma}{\mu} \quad (5)$$

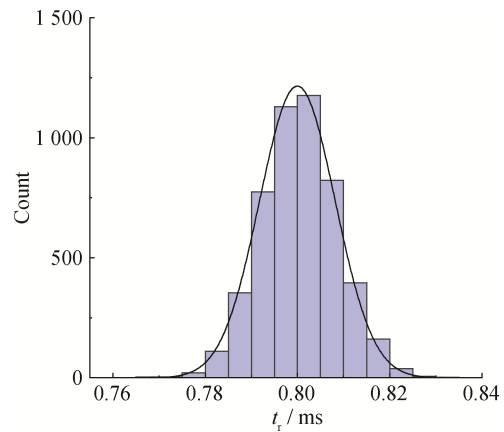


图3 分布拟合($S_{NR} = 40$ 、 $K_t = 3$)

Fig.3 Distribution fitting($S_{NR} = 40$ 、 $K_t = 3$)

2.2 信噪比对上升时间测量不确定度的影响

对不同信噪比的仿真试验进行结果统计，可以得到不同信噪比下上升时间测量不确定度的量化结果，如表1所示。表1中“#”处表示仿真试验的测量结果与构建的信号上升时间真值之间存在5%以上的误差，即在该信噪比下，5000组仿真试验中部分测试结果出现较大偏差，即使运用Dixon准则剔除粗大误差，仍然无法令仿真试验的测试结果与真值之间保持较高的一致性。此时噪声引入的不仅是测量不确定度，而是测量结果的误差，因此，这些组别的数据计算得到的不确定度未列入表1中。

由表1可知, K_i 在1~5范围内的仿真试验中, 不同信噪比的噪声引入的上升时间测量不确定度的差异很大, 随着信噪比的增加, 上升时间测量不确定度降低。在 $K_i = 1$ 时, 由于上升过程中采样点数较少, 仿真试验的分散性较大; 在 $K_i > 2$ 时, $S_{NR} > 40$ 的仿真结果均能将上升时间的相对扩展不确定度控制在3%以内。

表1 不同信噪比下的上升时间测量不确定度
Tab.1 Measurement uncertainty of rise time under different signal-to-noise ratio

S_{NR} / dB	$U_{95rel} / \%$				
	$K_i=1$	$K_i=2$	$K_i=3$	$K_i=4$	$K_i=5$
26	#	#	#	#	8.0
30	#	#	#	#	5.2
34	#	#	18.4	5.0	2.5
40	17.4	3.0	2.0	1.5	1.3
46	17.3	2.0	1.1	0.8	0.7

目前, 噪声引入的上升时间测量不确定度在评定上升时间的不确定度时, 通常隐含在试验的重复性中。因此, 在试验中降低噪声可以降低试验重复性引入的不确定度分量, 从而达到降低测量不确定度的目的。在实际的校准试验中, 由于采集设备等硬件的限制, 不一定能保证 K_i 和 S_{NR} 处于表1中 U_{95rel} 较小的范围内, 甚至可能处于表中“#”的范围内, 所以需要在试验中通过各种手段降低噪声。

2.3 降噪算法对上升时间测量不确定度的影响

在试验中, 一般可从两个方面降低噪声, 分别是试验中控制环境噪声的大小或试验后使用适当的算法进行处理。试验中控制噪声的方法难以定量分析, 在此不再赘述。下文从平滑滤波器的选取和参数设置方面分析降噪算法在降低上升时间测量不确定度时的效果。

2.3.1 平滑滤波器类型

Savitzky-Golay(S-G)平滑算法和移动平均(Moving average, MA)平滑算法是两种常用的平滑算法, 在处理含有噪声的斜台信号时, 可以使用平滑算法降低信噪比, 进而降低上升时间的不确定度。为了研究单一影响因素的影响, 在后文的分析中,

滤波算法的阶次均为2阶。对 $S_{NR} = 40$ 、 $K_i = 3$ 的5000组仿真数据进行滤波后, 同样通过统计方法进行分布拟合, 结果如图4和图5所示, 平滑算法没有改变分布的类型。通过分布参数计算上升时间的测试结果和不确定度, 经S-G平滑后, U_{95rel} 从2%降到了1.4%; 经MA平滑后, U_{95rel} 从2%降到了1.1%, 有效地降低了上升时间的不确定度。

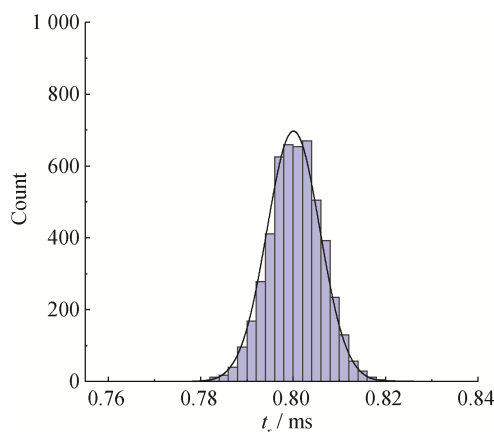


图4 分布拟合($S_{NR} = 40$ 、 $K_i = 3$, S-G平滑算法)

Fig.4 Distribution fitting ($S_{NR} = 40$ 、 $K_i = 3$, S-G smoothing algorithm)

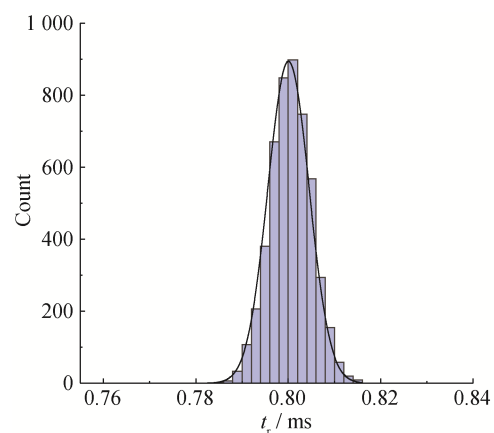


图5 分布拟合($S_{NR} = 40$ 、 $K_i = 3$, MA平滑算法)

Fig.5 Distribution fitting ($S_{NR} = 40$ 、 $K_i = 3$, MA smoothing algorithm)

将表1中由于信噪比较小而无法得到正确的上升时间的仿真试验结果进行平滑降噪, 取平滑窗长度为9, 得到的相对扩展不确定度如图6所示。 $K_i = 1$ 的仿真试验因斜台上升过程中只有10个数据点, 若使用降噪算法, 会造成波形失真, 导致上升时间的测试结果出现错误, 因此图6只展示了 K_i 在2~5的范围内、平滑前后的上升时间相对扩展

不确定度。由图6可知，S-G平滑算法和MA平滑算法均可对信噪比较小的信号起到降低上升时间测量不确定度的效果，在信噪比较小时，MA平滑算法的效果更明显，随着信噪比的增大，二者的作用效果趋于一致。

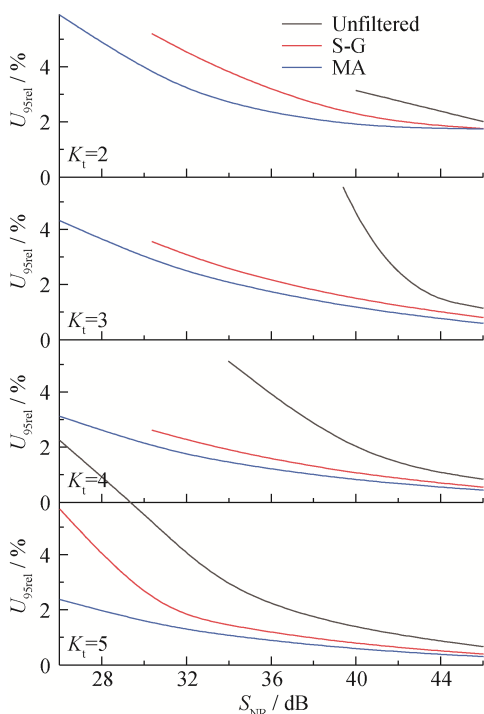


图6 平滑前后的上升时间相对扩展不确定度
Fig.6 Relative extended uncertainty of rise time before and after smoothing

2.3.2 平滑窗长度的选取

除了平滑算法的类型，平滑窗的长度也会影响降噪的效果，进而影响上升时间的测量不确定度。图7和图8分别展示了应用MA平滑算法和S-G平滑算法时，平滑窗长度的选取对最终上升时间的相对扩展不确定度的影响。由图7-8可知，随着平滑窗长度的增加，相对扩展不确定度有所下降，下降的趋势随着平滑窗长度的增加而逐渐趋于平缓。考虑到平滑窗越长，造成的阶跃斜台起始及终止时刻附近的失真越严重，因此窗长应至少比阶跃斜台上升过程中采样点数小1个数量级。在实际处理信噪比较小的试验数据时，应综合考虑以上两点，选取合适的平滑窗长，如对于 $K_i = 3$ 的采集序列，在使用平滑算法进行降噪时，选取20左右的平滑窗长就能达到较好的效果。

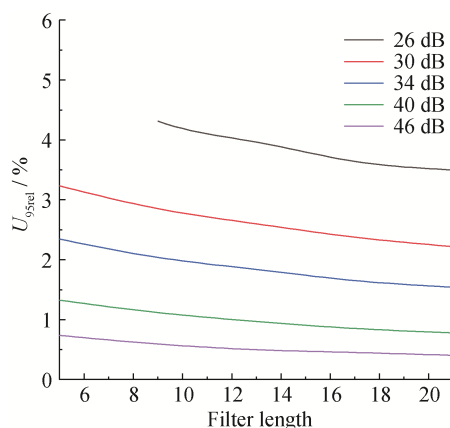


图7 平滑窗长度对上升时间的相对扩展不确定度的影响 (MA平滑算法)

Fig.7 Effect of smoothing window length on the relative extended uncertainty of rise time (MA smoothing algorithm)

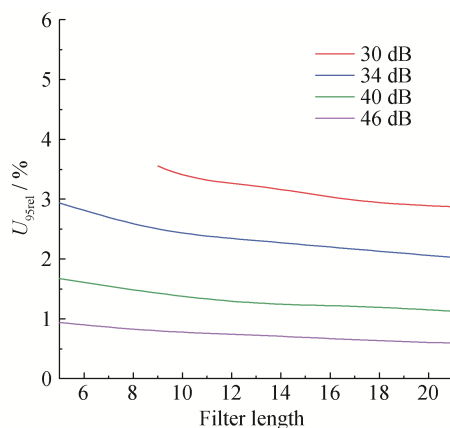


图8 平滑窗长度对上升时间的相对扩展不确定度的影响 (S-G平滑算法)

Fig.8 Effect of smoothing window length on the relative extended uncertainty of rise time (S-G smoothing algorithm)

3 试验验证

为了验证仿真结论并考察在实际试验中降噪方法的应用，在快开阀阶跃压力校准试验中对采样率的选取和不同平滑算法的应用进行比较。

3.1 试验设计

试验中，为了获取不同信噪比的采集结果，使用了2支结构相同、量程不同的动态压力传感器（量程分别为100 PSI和500 PSI），同时感受同一次阶跃压力，如图9所示。对于快开阀而言，本试验所用的开阀时间决定了能够产生的阶跃压力上升时间下限是毫秒级，而2支压力传感器自身的上升时间为微秒级，2支压力传感器之间上升时间的差

异比压力波本身产生的上升时间小3个数量级。因此，对2支传感器测量结果进行A类不确定度评定时，上升时间不确定度的差异来源主要是2支不同量程传感器测得信号的信噪比不同。通过重复30次试验可获得不同信噪比下的相对扩展不确定度，该值可以在一定程度上反映噪声对上升时间测量不确定度的影响。

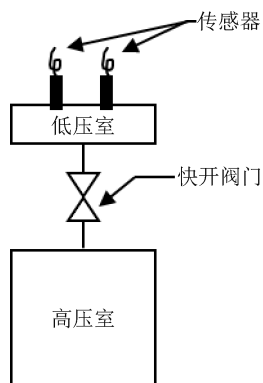


图9 验证试验示意图

Fig.9 Schematic diagram of validation test

3.2 试验结果

表2中展示了2支传感器的试验结果，试验中采样率为1 MHz，由试验测得的上升时间可估算得K_v值约为3，对阶跃压力发生前后压力平台稳定段

的噪声幅值进行分布分析，计算得到2支传感器测得信号的信噪比分别为32 dB和43 dB。2支传感器测得的上升时间分别为7.94 ms和7.69 ms，二者的相对误差不超过3%，可以认为二者对同一压缩波产生的上升时间的测试结果不存在明显错误。通过对相对扩展不确定度的对比可知，信噪比较大时，得到的相对扩展不确定度较小，这与仿真分析的趋势是一致的。

表2 不同信噪比下的上升时间及其测量不确定度试验结果

Tab.2 Test results of rise time and measurement uncertainty under different SNR

传感器量程 / PSI	S _{NR} / dB	t _r / ms	U _{95rel} / %
100	32	7.94	6.2
500	43	7.69	3.5

表3列出了使用平滑算法对采集到的信号进行处理后得到的测量结果，通过与表2对比可以得出：使用平滑算法可以显著降低上升时间的相对扩展不确定度，平滑窗长度越长，相对扩展不确定度越低，这种降低的趋势随着窗长的增加而逐渐平缓。

表3 不同平滑处理后的上升时间及其测量不确定度

Tab.3 Rise time and its measurement uncertainty after different smoothing treatments

平滑窗长度	t _r / ms				U _{95rel} / %			
	S _{NR} = 32 dB		S _{NR} = 43 dB		S _{NR} = 32 dB		S _{NR} = 43 dB	
	S-G算法	MA算法	S-G算法	MA算法	S-G算法	MA算法	S-G算法	MA算法
5	7.90	7.69	7.68	7.67	5.4	4.3	3.3	3.1
9	7.70	7.67	7.67	7.66	4.3	3.9	3.2	3.1
13	7.67	7.66	7.67	7.66	3.8	3.8	3.2	3.0
17	7.66	7.66	7.66	7.66	3.8	3.4	3.2	3.0
21	7.66	7.66	7.66	7.66	3.7	3.4	3.2	3.0

3.3 仿真与试验的差异分析

试验与仿真的差异主要体现在相对扩展不确定度的具体数值上。以试验中信噪比为43的30组重复试验的测量结果与仿真分析中信噪比为40、46的分析结果为例，将各参数列在表4中进行对比可知，在上升时间差异不大、采样频率相同时，

实际试验中的重复试验计算得到的相对扩展不确定度较大。这是由于在仿真中设置的噪声均为分布函数相同的随机噪声，进行多次试验只反映了噪声带来的上升时间不确定度。而实际试验中，重复试验计算出的不确定度分量不仅是由噪声的随机性引起的，还包含了标准源、采集设备、传

感器等硬件的重复性。因此,通过试验的手段只能验证仿真分析的趋势,无法彻底将噪声的影响单独剥离出来进行分析。

表4 仿真与试验结果对比表

Tab.4 Comparison table of simulation and test results

类型	S_{NR} / dB	采样率 / MHz	t_r / ms	U_{95rel} / %
仿真	40	1	8.00	2.0
仿真	46	1	8.00	1.1
试验	43	1	7.69	3.5

4 结论

通过数值仿真方法计算不同信噪比下阶跃信号上升时间的测量结果,结合统计方法计算不确定度分量,并对不同平滑算法在降低噪声引入的测量不确定度中所起的效果进行了比较,最终在快开阀阶跃压力测试系统中进行了试验验证。得到的主要结论如下:

1) 噪声对阶跃信号上升时间的测量不确定度有较大影响,信噪比越大,引入的上升时间的测量不确定度越小。因此,在进行上升时间的校准测试时,应采取必要手段降低噪声、增加信噪比。

2) 通过应用平滑降噪算法可以有效降低噪声引入的上升时间测量不确定度,选取算法进行处理时,MA平滑算法比S-G平滑算法的降噪效果更加明显。在选取降噪算法的平滑窗长度时,窗长的数量级应小于上升时间与采样间隔的比值的数量级,以避免波形失真。在此基础上适当增加窗长,可以进一步降低噪声引入的上升时间测量不确定度。

参考文献

[1] 郝晓剑,王萌萌. 热电偶时间常数测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2018(5): 70-73.
HAO X J, WANG M M. System for time constant test of thermocouple [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(5): 70-73. (in Chinese)

[2] 郝晓剑,张根甫,咎清波. 基于半导体激光器的热电偶时间常数测试系统及不确定度分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 224-228.
HAO X J, ZHANG G F, ZAN Q B. Thermocouple time constant test system and uncertainty analysis based on

semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 224-228. (in Chinese)

- [3] 梁志国,孙璟宇. 线性测量系统上升时间的测量不确定度[J]. 计量技术, 2004(1): 52-54.
LIANG Z G, SUN J Y. Measurement uncertainty of rise time in linear measurement systems [J]. Measurement Technique, 2004(1): 52-54. (in Chinese)
- [4] 梁志国. 方波上升时间的测量不确定度[J]. 计测技术, 2006, 26(3): 43-45.
LIANG Z G. The uncertainty of measurement evaluation of rise time of square wave [J]. Metrology & Measurement Technology, 2006, 26(3): 43-45. (in Chinese)
- [5] 王雅婷,梁志国,吴娅辉. 电阻应变数据采集系统上升时间的评价[J]. 计测技术, 2018, 38(S1): 139-143.
WANG Y T, LIANG Z G, WU Y H. Evaluation of rise time in resistance strain data acquisition system [J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38 (Supplement 1): 139-143. (in Chinese)
- [6] 寇琼月,张红,张磊. 数字示波器上升时间的测量不确定度分析与评定[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 31-34.
KOU Q Y, ZHANG H, ZHANG L. Analysis and evaluation of uncertainty of rise time measurement of digital oscilloscopes [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(1): 31-34. (in Chinese)
- [7] 梁志国. 数字存储示波器上升时间的测量不确定度评定[J]. 计量学报, 2012, 33(6): 555-558.
LIANG Z G. The uncertainty evaluation of rise time of digital storage oscilloscopes [J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(6): 555-558. (in Chinese)
- [8] 杨军,李程,张炳毅. 激波上升时间评定方法初探[J]. 计测技术, 2009, 29(B9): 40.
YANG J, LI C, ZHANG B Y. Preliminary exploration of shock wave rise time evaluation method [J]. Metrology & Measurement Technology, 2009, 29 (B9): 40. (in Chinese)
- [9] 李永生,姚贞建,丁义凡. 激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 10-18.
LI Y S, YAO Z J, DING Y F. High-accuracy estimation of the rise time of shock tube reflection step pressure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 10-18. (in Chinese)
- [10] 史舟淼,张树,施玉书,等. 低噪声触针式表面粗糙度

探测系统及测量不确定度分析[J]. 计量学报, 2022, 43(9): 1122-1127.

SHI Z M, ZHANG S, SHI Y S, et al. Evaluation of the uncertainty for the measurement of surface roughness by low noise probing system [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(9): 1122-1127. (in Chinese)

[11] 杨军, 李程, 张炳毅, 等. 低通滤波器的阶跃响应及其对动态校准的影响[J]. 计测技术, 2010, 30(6): 7-10.

YANG J, LI C, ZHANG B Y, et al. Step response of low-pass filter and its influence on dynamic calibration [J]. Metrology & Measurement Technology, 2010, 30(6): 7-10. (in Chinese)

[12] 胡晓敏, 童长青, 吴雨翠, 等. 精密信号调理对测温不确定度的影响分析[J]. 自动化仪表, 2021, 42(10): 43-45.

HU X M, TONG C Q, WU Y C, et al. Analysis of influence of precision signal conditioning on temperature measurement uncertainty [J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(10): 43-45. (in Chinese)

[13] 辛世杰, 丁雷. 测温系统中数字均值滤波器的不确定度评定[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 91-97.

XIN S J, DING L. Uncertainty evaluation of digital mean filter in temperature measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 91-97. (in Chinese)

[14] 杜亮. 数字示波器动态校准技术[J]. 计测技术, 2008, 28(S1): 90-91.

DU L. Dynamic calibration technology for digital oscilloscopes [J]. Metrology & Measurement Technology, 2008, 28(Supplement 1): 90-91. (in Chinese)

[15] 梁志国, 孟晓风. 一种负阶跃力源上升时间的评价[J]. 计测技术, 2008, 28(6): 13-15.

LIANG Z G, MENG X F. The rise time evaluation of one kind of negative step force [J]. Metrology & Measurement Technology, 2008, 28(6): 13-15. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 陈晓松(1996—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为动态压力计量测试。