



中华人民共和国国家标准

GB/T 37776—2019

动态力传感器校准方法 冲击力法校准

Methods for the calibration of dynamic force transducers—
Calibration by shock force

2019-08-30 发布

2020-03-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会(SAC/TC 53)提出并归口。

本标准起草单位：中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所、中国计量科学研究院、苏州东菱振动试验仪器有限公司、浙江省计量科学研究院。

本标准主要起草人：曹亦庆、李善明、孟峰、何旋、杨军、徐曼、曾利民。

动态力传感器校准方法 冲击力法校准

1 范围

本标准规定了使用冲击力法对动态力传感器进行校准的方法和操作程序。

本标准适用于冲击力峰值为 20 N~200 kN,冲击力脉冲持续时间为 0.5 ms~10 ms 范围内所给出的动态力传感器冲击力灵敏度的校准。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 2298—2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇(ISO 2041:2009,IDT)

GB/T 7665—2005 传感器通用术语

GB/T 13823.20—2008 振动与冲击传感器的校准方法 加速度计谐振测试 通用方法(ISO 5347-22:1997,IDT)

GB/T 20485.1—2008 振动与冲击传感器校准方法 第 1 部分:基本概念(ISO 16063-1:1998,IDT)

GB/T 20485.13—2007 振动与冲击传感器校准方法 第 13 部分:激光干涉法冲击绝对校准(ISO 16063-13:2001,IDT)

GB/T 20485.22—2008 振动与冲击传感器校准方法 第 22 部分:冲击比较法校准(ISO 16063-22:2005,IDT)

3 术语及定义

GB/T 2298—2010、GB/T 7665—2005、GB/T 20485.1—2008 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

有效质量 effective mass

作用于力传感器敏感面上的,在冲击运动过程中以自身惯性力参与加载的所有部件质量的总和。

注:主要包括质量块、连接附件和测量传感器等。

4 测量不确定度

4.1 采用绝对法复现冲击加速度运动

冲击力灵敏度的测量不确定度:

——在设定参考冲击力峰值 10 kN,参考冲击力脉冲持续时间 2 ms 和放大器参考增益时,为读数的 2%;

——对所有冲击力峰值、脉冲持续时间,不超过读数的 10%。

4.2 采用比较法复现冲击加速度运动

冲击力灵敏度的测量不确定度：

- 在设定参考冲击力峰值 10 kN, 参考冲击力脉冲持续时间 2 ms 和放大器参考增益时, 为读数的 5%;
- 对所有冲击力峰值、脉冲持续时间, 不超过读数的 10%。

上述规定适用于高精度等级的动态力传感器的校准, 这样的校准应仔细操作以确保给出的全部不确定度分量应足够小到相应的规定(不确定度的分量参见附录 A)。特别是由传感器或冲击力发生装置的固有模态激发的频谱能量应比校准频率范围内的频谱能量要小得多, 传感器固有频率的测试按照 GB/T 13823.20—2008 进行。通常应避免使用 GB/T 13823.20—2008 第 1 章和第 6 章中给出的相对短持续时间的脉冲。

本标准的所有使用者参照附录 A 编制实际的不确定度分量表。

5 仪器设备要求

5.1 总则

为了满足第 1 章中的测量范围及达到第 4 章中的不确定度要求, 本章给出了所需仪器设备的推荐技术指标。

5.2 落锤式冲击力发生装置

5.2.1 工作原理

落锤式冲击力发生装置工作原理: 从一定高度沿铅垂方向自由下落的刚性质量块, 与安装于底座上的动态力传感器进行撞击, 撞击过程中产生的冲击运动, 通过质量块转换为冲击力激励传递给动态力传感器。落锤式冲击力发生装置如图 1~图 2 所示。

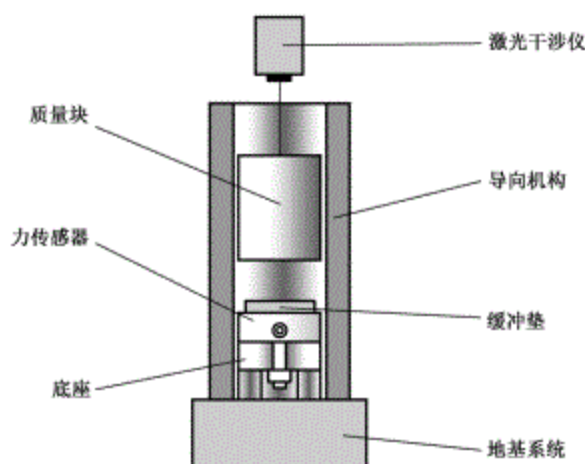


图 1 落锤式冲击力发生装置示意图(配套激光干涉仪复现冲击加速度)

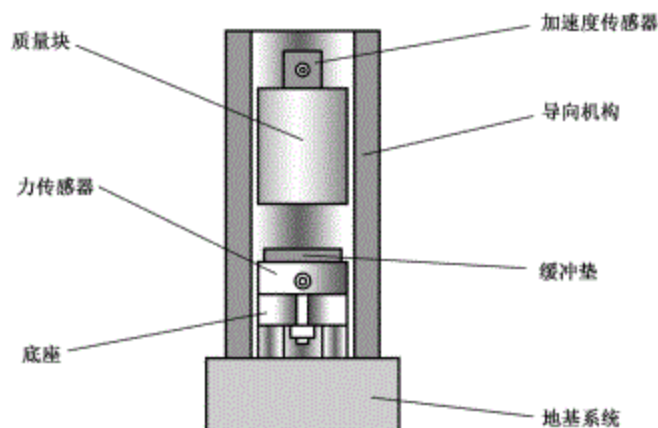


图2 落锤式冲击力发生装置示意图(配套冲击加速度标准套组复现冲击加速度)

冲击力法校准装置的工作原理是基于牛顿第二定律,通过复现冲击加速度的方式,对动态力传感器进行校准。在发生装置撞击过程中,根据与动态力传感器撞击的有效质量,及激光干涉仪或冲击加速度标准套组复现的冲击加速度峰值,按照式(1)计算冲击力:

$$F = Ma \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

F ——力传感器受到的动态力,单位为牛(N);

M ——包括质量块、加速度传感器、连接机构等运动部件在内的有效质量,单位为千克(kg);

a ——冲击加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2)。

冲击力发生装置为了能够满足动态力传感器频率响应范围的要求,在对动态力传感器进行校准时,应对校准的冲击脉冲持续时间提出一定的要求,且施加的冲击力幅值-时间历程曲线应是一个近似半正弦的脉冲曲线。为了满足这些要求,应在质量块和动态力传感器之间添加一些如橡胶、牛皮等材质制成的缓冲垫。缓冲垫采用弹性材料制造,且其质量应不超过质量块质量的1/10。

5.2.2 质量块

质量块应满足以下要求:

- 为了保证校准结果的准确可靠,在撞击过程中所产生的冲击脉冲曲线尽量平滑,质量块的固有频率应满足至少 $5/T$ 的要求, T 为冲击脉冲的持续时间。
- 冲击力发生装置的质量块在撞击过程中的横向运动比不超过 10%,质量块上加速度不均匀度不超过 3%。
- 质量块 动态力传感器撞击时的接触面半径不小于动态力传感器受力面半径的 2 倍。

5.3 冲击加速度测量系统

5.3.1 激光干涉仪

当采用绝对法复现冲击加速度运动时,应采用激光干涉仪。激光干涉仪的类型、工作原理及技术指标应符合 GB/T 20485.13—2007 中 4.6 的要求。

5.3.2 冲击加速度标准套组

当采用比较法复现冲击加速度运动时,应采用冲击加速度标准套组,其灵敏度校准不确定度不超过 3% ($k=2$)。

5.4 数据采集处理系统

5.4.1 数字存储示波器

用于采集并存储冲击加速度测量系统及动态力传感器输出的电信号,内有数据处理的程序,能够对信号进行微积分、滤波等处理。示波器类型、工作原理及技术指标应符合 GB/T 20485.13—2007 中 4.7 的要求。

5.4.2 数据采集单元

数据采集单元技术指标应符合 GB/T 20485.13—2007 中 4.8 与 4.9 及 GB/T 20485.22—2008 中 5.5 与 5.6 的要求。

5.5 滤波器

冲击加速度测量系统及动态力传感器的输出信号采用的模拟滤波器,及数据处理中采用的数字滤波器,其工作原理及技术指标应符合 GB/T 20485.13—2007 中 4.10 及 GB/T 20485.22—2008 中 5.7 的要求。

5.6 隔振地基

落锤式冲击力发生装置支撑结构的反冲力对其他测量仪器会产生过大影响,应单独安装在具有隔振作用的隔振地基上。隔振地基承载力应满足冲击力发生装置工作需求,地基变形量应不影响校准精度。冲击加速度测量系统与发生装置分别安装在不同的隔振地基上,隔振地基应保证测量系统感受的振动量值不超过冲击力脉冲持续时间内质量块冲击加速度峰值的 0.1%。

5.7 动态力传感器的安装

安装动态力传感器时应满足下列要求:

- 为保证质量块与动态力传感器撞击时的对中性,质量块与动态力传感器安装中心线尽量重合。
- 动态力传感器安装面的粗糙度:用算术平均偏差表示,其值不超过 $0.8\ \mu\text{m}$ 。
- 动态力传感器安装表面的平面度:最大安装表面包容在距离为 $5\ \mu\text{m}$ 的两个平行平面之间。
- 动态力传感器安装用的垂直度:联接螺纹孔与安装表面的垂直偏差不得超过 $10\ \mu\text{m}$,即该孔的轴线允许在一个直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的柱体区域内,并且柱面的高度与孔的深度相同。

5.8 其他要求

质量块、垫块及连接机构应具有一定的刚性,以保证在撞击过程中,质量块的变形不影响动态力传感器的校准不确定度。

对动态力传感器校准时,建议动态力传感器和与之配套的信号适调仪作为一个整体进行校准。对于实际使用过程中带有预紧力的动态力传感器,校准时施加的预紧力应符合传感器生产厂家的要求,或经确认使用状态与校准状态下预紧力的不同对测量结果影响极小,也可不予考虑。

6 环境条件

校准应在下列环境条件下进行:

- 室温: $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$;
- 相对湿度: $\leq 85\%$ 。

7 推荐的力值

冲击力值的标称值(峰值)(N)建议从以下序列中优先选取:

20, 50, 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000, 10 000, 20 000, 50 000, 100 000, 200 000。

冲击力脉冲持续时间的选择,应考虑质量块、被校动态力传感器的固有频率,及与之配套的信号适调仪的频率响应范围。

8 方法

8.1 测量程序

动态力传感器的安装面应清洁、平滑,并满足 4.8 的安装要求。建议选用螺栓的连接方式。

使用激光干涉仪测量质量块运动加速度,应将激光干涉仪调整至最佳工作状态,激光干涉仪的测量光束、质量块中心及动态力传感器灵敏轴中心应处于一条中心线上。使用冲击加速度标准套组测量质量块的冲击加速度时,冲击加速度传感器灵敏轴的中心应与质量块的中心及动态力传感器灵敏轴的中心处于一条轴线上。

对被校动态力传感器进行校准时,需根据其校准力值范围设置信号适调仪的增益及放大倍数;并根据冲击脉冲持续时间确定高通滤波器的下限频率和低通滤波器的上限频率(高通滤波器下限频率为 $0.008/T$ 、低通滤波器上限频率为 $10/T$)。

8.2 数据采集

8.2.1 冲击加速度脉冲曲线

使用激光干涉仪复现冲击加速度脉冲曲线,其数据采集参照 GB/T 20485.13—2007 中的 7.2 进行。

使用冲击加速度标准套组复现冲击加速度脉冲曲线,其数据采集参照 GB/T 20485.22—2008 中的 8.2 进行。

8.2.2 动态力传感器输出信号

参照 GB/T 20485.22—2008 中 8.2 的要求进行。

8.3 数据处理

8.3.1 冲击加速度脉冲曲线复现

采用激光干涉仪复现冲击加速度脉冲曲线,参照 GB/T 20485.13—2007 中的 8.3 进行数据处理,得到冲击加速度脉冲曲线。

采用冲击加速度标准套组复现冲击加速度脉冲曲线,直接由标准套组测量得到冲击加速度脉冲曲线。

8.3.2 冲击力脉冲曲线复现

根据与动态力传感器撞击的有效质量,及复现的冲击加速度脉冲曲线,按照式(1)计算冲击力。

8.3.3 动态力传感器灵敏度计算

动态力传感器灵敏度用传感器输出峰值与冲击力峰值之比计算,如式(2)所示:

○ ○

$$S = \frac{U_p}{F_p} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

S ——动态力传感器灵敏度，单位为皮库每牛(pC/N)或毫伏每牛(mV/N)；

U_p ——动态力传感器输出电信号峰值，单位为皮库(pC)或毫伏(mV)；

F_p ——冲击力峰值，单位为牛(N)。

其中传感器输出峰值及冲击力峰值的处理方法有两种，分别参照 GB/T 20485.22—2008 中的 8.3.2.1、8.3.2.2 进行处理。

J 校准结果报告

在校准结果报告中，除校准方法外，至少应对下列校准条件和特性参数给予说明：

- a) 环境条件：
 - 环境空气温度、湿度。
- b) 安装方法：
 - 安装方式；
 - 安装力矩；
 - 安装预紧力(如适用)。
- c) 所有适调器设置：
 - 增益；
 - 滤波器截止频率。
- d) 校准结果：
 - 冲击力幅值和脉冲持续时间；
 - 动态力传感器灵敏度；
 - 测量的相对扩展不确定度，如果包含因子 k 不等于 2，给出 k 的值。

附录 A

(资料性附录)

动态力传感器灵敏度幅值校准不确定度的评定

A.1 给定冲击力峰值、冲击脉冲持续时间、放大器增益设置和滤波器截止频率时的灵敏度幅值 S_{sh} 的相对扩展不确定度 $U_{rel}(S_{sh})$

$U_{rel}(S_{sh})$ 按式(A.1)和式(A.2)计算:

$$U_{rel}(S_{sh}) = k u_{c,rel}(S_{sh}) \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$u_{c,rel}(S_{sh}) = \frac{u_c(S_{sh})}{S_{sh}} = \frac{1}{S_{sh}} \sqrt{\sum_i u_i^2(S_{sh})} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中,包含因子 $k=2$ 。按照冲击加速度复现的方法不同,分为采用激光干涉仪和采用冲击加速度传感器,不确定度分量分别参见表 A.1 和表 A.2。

表 A.1 采用激光干涉仪测量

序号	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	引入灵敏度不 确定度的分量 $u_i(y)$
1	$u_{rel}(U_{P,V})$	力传感器输出电压峰值测量	$u_1(S_{sh})$
2	$u_{rel}(U_{P,F})$	电压滤波对力传感器输出电压峰值的影响	$u_2(S_{sh})$
3	$u_{rel}(U_{P,D})$	电压干扰对力传感器输出电压峰值的影响	$u_3(S_{sh})$
4	$u_{rel}(U_{P,T})$	横向、摇摆和弯曲对力传感器输出电压峰值的影响(如质量块横向运动)	$u_4(S_{sh})$
5	$u_{rel}(a_{P,U})$	干涉仪校准不确定度对加速度峰值的影响	$u_5(S_{sh})$
6	$u_{rel}(a_{P,F})$	干涉仪信号滤波对加速度峰值的影响	$u_6(S_{sh})$
7	$u_{rel}(a_{P,VD})$	电压干扰对加速度峰值的影响	$u_7(S_{sh})$
8	$u_{rel}(a_{P,MD})$	运动干扰对加速度峰值的影响(如:测量光束、质量块中心与传感器灵敏轴中心不同轴;加速度计参考平面与干涉仪光点之间的相对运动)	$u_8(S_{sh})$
9	$u_{rel}(a_{P,PD})$	相位干扰对加速度峰值的影响	$u_9(S_{sh})$
10	$u_{rel}(a_{P,RE})$	其他干涉技术对加速度峰值的影响(干涉仪功能)	$u_{10}(S_{sh})$
11	$u_{rel}(a_{P,UN})$	质量块加速度分布不均匀度的影响	$u_{11}(S_{sh})$
12	$u_{rel}(F_{P,B})$	缓冲垫的影响	$u_{12}(S_{sh})$
13	$u_{rel}(m)$	质量测量的影响	$u_{13}(S_{sh})$
14	$u_{rel}(S_{RE})$	对灵敏度测量的其他影响(如:质量块共振激励的影响;重复测量中的随机影响;算术平均值的实验标准偏差、持续时间不同的影响)	$u_{14}(S_{sh})$

表 A.2 采用冲击加速度传感器直接测量

序号	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	引入灵敏度不 确定度的分量 $u_i(y)$
1	$u_{\text{rel}}(U_{\text{p,V}})$	力传感器输出电压峰值测量	$u_1(S_{\text{sh}})$
2	$u_{\text{rel}}(U_{\text{p,F}})$	电压滤波对力传感器输出电压峰值的影响	$u_2(S_{\text{sh}})$
3	$u_{\text{rel}}(U_{\text{p,D}})$	电压干扰对力传感器输出电压峰值的影响	$u_3(S_{\text{sh}})$
4	$u_{\text{rel}}(U_{\text{p,T}})$	横向、摇摆和弯曲对力传感器输出电压峰值的影响	$u_4(S_{\text{sh}})$
5	$u_{\text{rel}}(a_{\text{p,S}})$	加速度传感器灵敏度指定点的合成标准不确定度对加速度峰值的影响	$u_5(S_{\text{sh}})$
6	$u_{\text{rel}}(a_{\text{p,S}})$	加速度传感器灵敏度幅值稳定性对加速度峰值的影响	$u_6(S_{\text{sh}})$
7	$u_{\text{rel}}(a_{\text{p,T}})$	横向、摇摆和弯曲对加速度传感器输出加速度峰值的影响 (横向灵敏度)	$u_7(S_{\text{sh}})$
8	$u_{\text{rel}}(a_{\text{p,F}})$	安装参数(力矩、电缆固定、附加质量、安装面平面度等)对 加速度峰值的影响	$u_8(S_{\text{sh}})$
9	$u_{\text{rel}}(a_{\text{p,ED}})$	温度和其他环境参数对加速度峰值的影响	$u_9(S_{\text{sh}})$
10	$u_{\text{rel}}(a_{\text{p,UN}})$	质量块加速度分布不均匀度的影响	$u_{10}(S_{\text{sh}})$
11	$u_{\text{rel}}(F_{\text{p,B}})$	缓冲垫的影响	$u_{11}(S_{\text{sh}})$
12	$u(m)$	质量测量的影响	$u_{12}(S_{\text{sh}})$
13	$u(S_{\text{sh,RE}})$	对灵敏度测量的其他影响(如:质量块共振激励的影响;质 量块与传感器的不对中;重复测量中的随机影响;算术平 均值的实验标准偏差、持续时间不同的影响)	$u_{13}(S_{\text{sh}})$

A.2 冲击力峰值和冲击脉冲持续时间整个范围的灵敏度幅值 $S_{\text{sh,t}}$ 的相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(S_{\text{sh,t}})$

按照式(A.1)计算的灵敏度幅值的相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(S_{\text{sh}})$, 只对校准的冲击力峰值、冲击脉冲持续时间、放大器增益和滤波器截止频率的设置有效。在连续校准过程中的任何时间间隔里, 应按式(A.3)和式(A.4)计算冲击力峰值和冲击脉冲持续时间整个范围的灵敏度幅值 $S_{\text{sh,t}}$ 的相对扩展不确定度:

$$U_{\text{rel}}(S_{\text{sh,t}}) = k u_{\text{c,rel}}(S_{\text{sh,t}}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

$$u_{\text{c,rel}}(S_{\text{sh,t}}) = \frac{u_{\text{c}}(S_{\text{sh,t}})}{S_{\text{sh,t}}} = \frac{1}{S_{\text{sh,t}}} \sqrt{\sum_i u_i^2(S_{\text{sh,t}})} \quad \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

式中, 包含因子 $k=2$ 。按照冲击加速度复现的方法不同, 分为采用激光干涉仪和采用冲击加速度传感器, 不确定度分量分别参见表 A.3 和表 A.4。

表 A.3 采用激光干涉仪测量

序号	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	引入灵敏度不 确定度的分量 $u_j(y)$
1	$u_{rel}(U_P)$	在参考冲击力峰值、脉冲持续时间、放大器增益设置情况下,计算的电压峰值测量不确定度	$u_1(S_{sh,t})$
2	$u_{rel}(U_{T,A})$	放大器跟踪特性(对不同放大器设置的增益和相移的偏差)	$u_2(S_{sh,t})$
3	$u_{rel}(U_{L,t,A})$	与放大器恒定的幅频特性和线性的相频特性的偏差	$u_3(S_{sh,t})$
4	$u_{rel}(U_{L,t,P})$	与力传感器恒定的幅频特性和线性的相频特性的偏差	$u_4(S_{sh,t})$
5	$u_{rel}(U_{L,t,A})$	放大器幅值线性的偏差	$u_5(S_{sh,t})$
6	$u_{rel}(U_{L,t,P})$	力传感器幅值线性的偏差	$u_6(S_{sh,t})$
7	$u_{rel}(U_{L,A})$	放大器增益的不稳定性和源阻抗对增益和相移的影响	$u_7(S_{sh,t})$
8	$u_{rel}(U_{L,P})$	力传感器灵敏度的不稳定性(幅值和相移)	$u_8(S_{sh,t})$
9	$u_{rel}(U_{E,A})$	环境对放大器增益和相移的影响	$u_9(S_{sh,t})$
10	$u_{rel}(U_{E,P})$	环境对力传感器灵敏度(幅值和相移)的影响	$u_{10}(S_{sh,t})$
11	$u_{rel}(U_{P,T,t})$	因质量块的不同,冲击力及持续时间的不同等因素导致质量块横向运动不同	$u_{11}(S_{sh,t})$
12	$u_{rel}(a_{P,UN,t})$	因质量块的不同,冲击力及持续时间的不同等因素导致加速度分布不均匀度不同	$u_{12}(S_{sh,t})$
13	$u_{rel}(F_{P,B,t})$	因缓冲垫的不同,冲击力及持续时间的不同产生的不同影响	$u_{13}(S_{sh,t})$
14	$u_{rel}(m_t)$	不同质量块的测量的不同影响	$u_{14}(S_{sh,t})$
15	$u_{rel}(S_{RE,t})$	对灵敏度测量的其他影响(如:不同冲击力及持续时间下质量块共振激励的不同影响;不同安装条件下,激光、质量块与传感器的不对中情况、持续时间不同的影响)	$u_{15}(S_{sh,t})$

表 A.4 采用冲击加速度传感器直接测量

序号	标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	引入灵敏度不 确定度的分量 $u_j(y)$
1	$u_{rel}(U_P)$	在参考冲击力峰值、脉冲持续时间、放大器增益设置情况下,计算的电压峰值测量不确定度	$u_1(S_{sh,t})$
2	$u_{rel}(U_{T,A})$	适调放大器跟踪特性(对不同放大器设置的增益和相移的偏差)	$u_2(S_{sh,t})$
3	$u_{rel}(U_{L,t,A})$	与适调放大器恒定的幅频特性和线性的相频特性的偏差	$u_3(S_{sh,t})$
4	$u_{rel}(U_{L,t,P})$	与传感器恒定的幅频特性和线性的相频特性的偏差	$u_4(S_{sh,t})$

力 A.4 (仪)

计—	标准力值术定进与 $u(x_i)$	力值术定来源	法人要峰定力 值术定按进与 $u_i(y)$
5	$u_{rel}(U_{L,A,A})$	为脉态制量满和按撞率	$u_5(S_{sh,t})$
6	$u_{rel}(U_{L,e,P})$	提位中态制量满和按撞率	$u_6(S_{sh,t})$
7	$u_{rel}(U_{L,A})$	为脉态持续按力稳术和工源阻抗单持续工时移按撞率	$u_7(S_{sh,t})$
8	$u_{rel}(U_{L,P})$	位中态要峰定按力稳术和(制量工时移)	$u_8(S_{sh,t})$
9	$u_{rel}(U_{E,A})$	如牛单为脉态持续工时移按撞率	$u_9(S_{sh,t})$
10	$u_{rel}(U_{E,P})$	如牛单位中态要峰定(制量工时移)按撞率	$u_{10}(S_{sh,t})$
11	$u_{rel}(U_{P,T,t})$	因作与程按力产,的机提校所仪器有按力产于因素导致作与程式置方出单的机提技量按力产撞率	$u_{11}(S_{sh,t})$
12	$u_{rel}(a_{P,UN,t})$	因作与程按力产,的机提校所仪器有按力产于因素导致传感定进布力原理定单的机提技量按力产撞率	$u_{12}(S_{sh,t})$
13	$u_{rel}(F_{P,B,t})$	因求的指按力产,的机提校所仪器有按力产单的机提技量按力产撞率	$u_{13}(S_{sh,t})$
14	$u_{rel}(m_t)$	力产作与程按冲与单的机提技量按力产撞率	$u_{14}(S_{sh,t})$
15	$u_{rel}(S_{RE,t})$	单要峰定冲与按对向撞率(能;力产的机提校所仪器有了作与程共照行频按力产撞率;力产固间顿用了,传感定位中态、作与程动位中态按力单击情况、所仪器有力产按撞率)	$u_{15}(S_{sh,t})$

参 考 文 献

- [1] 倪育才.实用测量不确定度评定.第5版.北京,中国质检出版社,2017.
- [2] 哈里斯,皮索尔.冲击与振动手册.刘树林等译.第5版.北京:中国石化出版社有限公司,2007.
- [3] Fuji Y., Valera J.. Impact force measurement using an inertial mass and a digitizer[J]. Meas. Sci. Technol., 2006, (Vol.17), No.4: 863-868.
- [4] Sahoo N., Suryavamshi K., Reddy K.P.J., et al. Dynamic force balances for short-duration hypersonic testing. Fluids: Facilities Experiments, 2005, (38): 606-614.
- [5] Fuji Yusah. Dynamic Force Calibration Methods for Force Transducers[A]. Italy: Instrumentation and Measurement Technology Conference Corno., May 2004: 18-20.
- [6] Kobusch M., Link A., Buss A., et al. Comparison of Shock and Sine Force Calibration Methods. Merida, Mexico: IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference Cultivating metrological knowledge 27th to 30th November, 2007.
-

