

摘要：振动冲击是自然界中广泛存在的现象，严重的振动冲击危害着人员生命和武器装备的安全。为防止这些危害的发生，实际工程中对振动冲击的设计与分析都提出了更高的要求。传感器的正确校准直接影响到振动冲击测量结果的准确可靠，传感器的瞬态校准影响更加严重。目前广泛应用的振动冲击传感器瞬态校准有机械式碰撞装置、电磁能释放装置、霍普金斯棒装置。本文详细地介绍了这三种装置的结构组成、工作原理及其在校准时使用的绝对校准和比较校准两种方法。

关键词：振动冲击；传感器；瞬态校准

中图分类号：TP212 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2020)06-0026-05

收稿日期：2020-05-05

振动冲击传感器的瞬态校准装置和方法

毕文辉

92493 部队 60 分队，辽宁葫芦岛 125000

一、前言

振动冲击是自然界中广泛存在的现象。行驶的车辆、航行的军舰、飞行的战机、导弹的发射装置、太空中的卫星等时刻经历着各类形式的振动冲击。这些振动冲击危害着人员生命和武器装备的安全^[1]。为防止这些危害的发生，在实际的工程中必须对振动冲击的设计与分析提出更高的要求。

传感器的正确校准直接影响振动冲击测量结果的准确可靠。根据传感器的特性，振动冲击传感器的校准分为稳态校准和瞬态校准。传感器的灵敏元件在冲击作用下所承受的载荷和应力与稳态校准时明显不同，因此冲击情况下不能采用传感器稳态校准的数据，必须通过瞬态校准取得所需的数据。

二、瞬态校准

瞬态校准也叫冲击校准，是用按半正弦规律变化的加速度冲击脉冲作为标准的运动形式，冲击持续时间和峰值加速度值是表征这种冲击脉冲的两个主要参量。为了能在几个 g 到几十万 g 的冲击加速度值范围内，在几十毫秒到几十微秒的冲击持续时间内对加

速度计进行冲击校准，不断地采用最新技术，建立了较完整的冲击校准装置和校准方法，目前冲击校准的准确度达到 $\pm 2\% \sim \pm 10\%$ 左右。

三、冲击校准装置

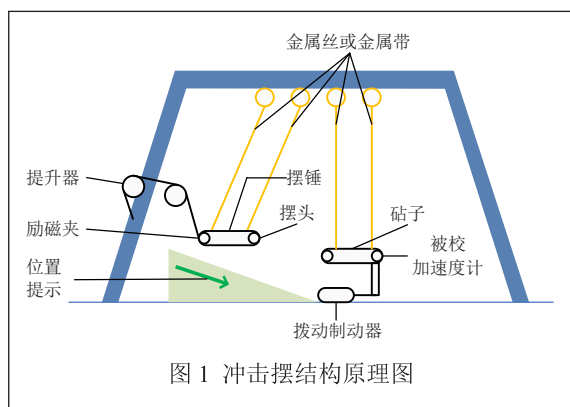
机械式碰撞装置、电磁能释放装置、霍普金斯棒装置是目前振动冲击传感器进行冲击校准使用最多的三种装置^[2]。

1、机械式碰撞装置

机械式碰撞装置常见的有冲击摆、跌落台、落球冲击装置、空气枪、空气炮等，通过两个物体的机械碰撞来产生冲击运动。

(1) 冲击摆、跌落台

冲击摆与跌落台都是产生标准冲击运动的冲击校准装置。两者的结构虽然不同，但工作原理一样，都是通过两个质量块相互碰撞，被校的加速度计固定在其中一质量块上。图 1 为冲击摆结构原理图。通过改变两质量块的几何形状、材料和质量，就可以改变加速度的参数。冲击摆的测量范围加速度在几个 g 到几百个 g，冲击持续作用时间约十几毫秒至数百微秒，



被校传感器的质量较小，大约在 $1\text{kg} \sim 2\text{kg}$ 内。跌落台的加速度测量范围在 $10\text{g} \sim 2000\text{g}$ 之间，冲击持续作用时间在几百微秒至十几毫秒之间，但被校传感器的质量较大，可达 10kg 。

(2) 落球冲击装置^[3]

从 1m 高左右自由下落的钢球与装有加速度的砣子（预先由磁铁吸住）发生碰撞后，砣子得到速度下落，而钢球被卡球器垫圈托住，装在砣子上的加速度计就承受冲击运动。钢球下落的高度固定，碰撞时的能量不变，通过改变砣子碰撞面上的橡胶衬垫可改变冲击持续作用时间，以获得不同的校准加速度值。冲击脉冲的峰值加速度值决定于砣子的质量、球的质量和衬垫的材料，图2为落球冲击校准装置结构原理图。落球冲击校准装置应当与标准加速度计和标准放大器系统连用，以便在 $100\mu\text{s} \sim 3\text{ms}$ 的冲击持续作用时间内，在 $20\text{g} \sim 10^4\text{g}$ 的加速度范围内对压电式或压阻式传感器进行校准，同时也可用来校准加速度计的共振频率。在该装置上可用绝对法（速度改变法）或比较法进行校准，被校传感器的质量一般在几十克以下。

(3) 空气枪、空气炮

将一弹体在枪（或炮）中用一定的方式起动并加速，由它去碰撞带有被校加速度计的靶，从而构成空气枪（或空气炮）校准装置。用这种方法可得到数万个 g 到数十万个 g 的高 g 值冲击，也可进行长冲击作用时间、低 g 值的冲击校准^[4]。

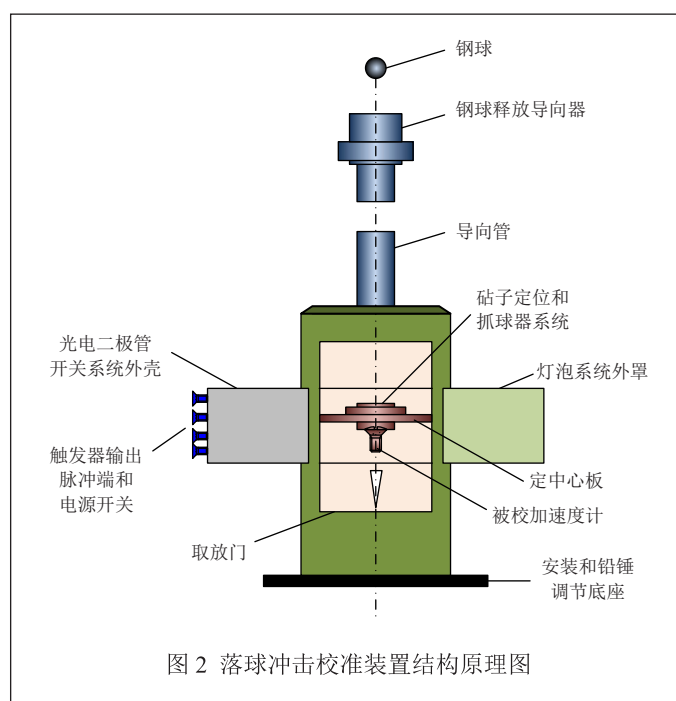
2、电磁能释放装置

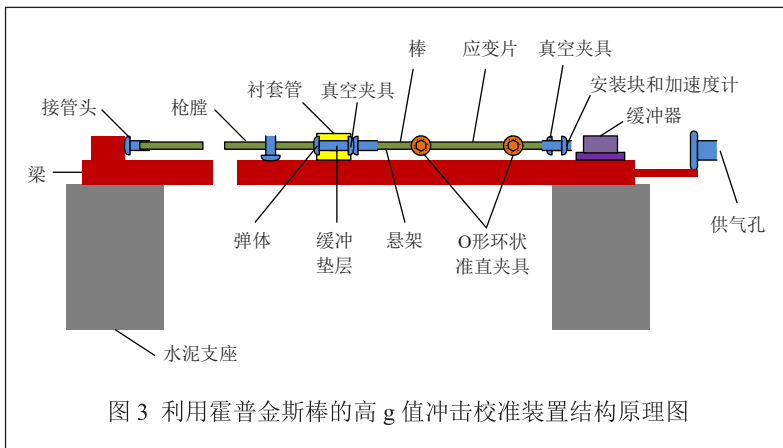
这种装置是应用电磁能量的冲击设备，将储

藏在电容箱中的能量通过线圈释放，使载有被校加速度计的抛射体产生极大的加速度，最大可达 10^5g ，冲击脉冲持续作用时间可达 $10\mu\text{s} \sim 100\mu\text{s}$ 。对这种冲击装置可用速度改变法或冲击力法进行测量，也可用激光测速系统进行绝对校准，准确度可达 $\pm 4\%$ 或更小。利用水中放电的电动液压效应产生冲击的装置也属于这一类，加速度范围为 $5 \times 10^4 \text{ m/s}^2 \sim 7 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ，冲击脉冲持续作用时间为 $0.2\mu\text{s} \sim 2\mu\text{s}$ 。

3、霍普金斯棒装置

在细长棒的一端安装铝垫，被校加速度计用耦合器和真空夹具安装在另一端面，将其与具有抛物面尖头弹体同轴相撞，碰撞后压缩波到达棒的末端，被校加速度计的运动速度与贴在棒中部的两个应变片成正比，图3为利用霍普金斯棒的高 g 值冲击校准装置结构原理图。在加速度计脉冲反号后，接口处产生拉伸，加速度计安装块与棒脱开。记录被校加速度计的输出脉冲之后，空气阻尼缓冲器覆盖着泡沫橡胶的活塞将飞着的加速度计及其安装块接住。该装置可产生半正弦加速度脉冲，加速度值高达 $10^5\text{g} \sim 10^6\text{g}$ ，冲击脉冲宽度达 $100\mu\text{s}$ 。





击持续作用时间 1ms ~ 20ms 内，加速度范围 50g ~ 5000g，准确度达到 2% ~ 5%。

3、多普勒干涉法^[5]

多普勒系统的活动反射体通常选择装有加速度计的表面，当对该表面进行冲击时，通过系统频率的多普勒偏移来确定运动体随时间的变化情况。因此，有关的运动量可直接由长度和时间来测定，与被校加速度计的输出完全无关，这样就可通过测量靶体速

度改变而引起的多普勒变化来校准冲击加速度计。它可克服前几种方法的缺点，获得较高的准确度，使冲击校准的方法有了重大的进展。采用这种方法可在 10g ~ 10⁴g 的加速度范围内，在 200μs ~ 50ms 的冲击作用持续时间内进行冲击校准。

这实际上是一个光频调制器，由所得到的频率调制波通过解调可得到反射的速度。解调器的输出正比于瞬时频率的偏移，应用多普勒频移方程可直接由瞬时频率确定瞬时速度。因此，该系统能检测出机械冲击引起的运动，给出正比于运动速度的信号。对该信号进行处理、分析，并同由承受这一运动的被校加速度计来的信号进行比较，便可以校准。这种装置的优点是：

- (1) 与传感器无关；
- (2) 在机械冲击频谱内，所测得的光频多普勒变化与运动速度成线性关系；
- (3) 可以测出幅度范围宽、频率成份丰富的冲击运动；
- (4) 迅速而准确分析最终的信号。

速度改变法、冲击力法和多普勒干涉法这三种绝对校准法的加速度测量范围、冲击作用持续时间、测量准确度和各自优级缺点见表 1^[2]。

4、背靠背的比较法

与振动校准的比较法类似，使标准参考加速度计与被校加速度计背靠背地承受同样的冲击运动，两个加速度计同时测量冲击运动的大小并进行比较，既可消除校准误差，又节省校准时间。

四、冲击校准方法

校准冲击传感器的方法有绝对校准法和比较校准法两种。绝对校准法包括速度改变法、冲击力法和多普勒干涉法；比较校准法包括背靠背的比较法和傅里叶变换法。

1、速度改变法

速度改变法借助碰撞使被校加速度计突然加速，或通过碰撞使运动的加速度计突然停止，或改变其运动方向来实现校准。也就是用机械式冲击产生突然的速度改变，得到较大的加速度，对加速度计进行冲击校准。装有被校加速度计的质量块在受到冲击作用之后速度发生变化，速度变化量由相隔已知距离的光检测器测出，被校加速度计的输出信号由示波器记录。被校加速度计的灵敏度由测得的速度改变量和记录下来的波形所包含的面积来确定。

加速度改变法能够在 20g ~ 10⁴g 的加速度范围内，冲击作用持续时间在 10μs ~ 100μs 的范围内校准冲击加速度计，可用于冲击摆、跌落台、落球及冲击炮等校准装置，准确度达到 4% ~ 10%。但该方法在实际校准中因加速度计的非线性会带来一定的误差。

2、冲击力法

冲击力校准法首先将动态力传感器安装在砧子上，然后将装有被校加速度计的小型载体沿导管自由下落到其上面，根据牛顿定律，通过峰值力和总的冲击质量就可以计算出峰值加速度值。

这种方法适用于各种机械式冲击校准装置，冲

表 1 绝对冲击校准法测量范围和优缺点

绝对校准方法	加速度范围	冲击作用持续时间	准确度	优缺点
速度改变法	20g ~ 10 ⁴ g	10 μ s ~ 100 μ s	4% ~ 10%	可用于冲击摆、跌落台、落球及冲击炮等校准装置，加速度测量范围大，冲击作用持续时间长，测量准确度低。
冲击力法	50g ~ 5000g	1ms ~ 20ms	2% ~ 5%	适用于各种机械式冲击校准装置，加速度测量范围较小，冲击作用持续时间较长，测量准确度中等。
多普勒干涉法	10g ~ 10 ⁴ g	200 μ s ~ 50ms	< 4%	与传感器无关，加速度测量范围大，冲击作用持续时间长，测量准确度高。

5、傅里叶变换法

近年来由于高速数字计算机被广泛采用，就使得有可能应用快速傅里叶变换法，将加速度计的响应转换到频率域，用数字计算机算出输出信号傅里叶积分变换的比值，从而借助于标准加速度计对被校加速度计作比较校准。由已知的标准加速度计的灵敏度求得被校加速度计的结果完全相同。用此法可在整个频带内求得任意点的灵敏度值，所得结果与一般正弦校准的结果完全相符。

图 4 给出了快速傅里叶变换法所用冲击校准设备的方框图。

快速傅里叶变换法能处理大量的数据，分析速度快，准确度高，与通常的正弦校准相比，这种以变换

技术为核心的冲击比较校准法有四个优点：

- (1) 避免被校加速度计承受可能会损坏的强稳态正弦振动；
- (2) 最终可给出较准确的校准结果；
- (3) 被校加速度计所处的冲击环境与使用条件相同；
- (4) 可以节省校准时间。

标准加速度计在整个带宽内的灵敏度值是校准的必需参数，快速傅里叶变换法与典型的峰值响应法相比，完全可以满足工作用加速度计的校准需求。

五、结束语

振动冲击传感器的瞬态校准直接影响到振动冲击测量的结果，越来越受到重视。目前对振动冲击传感器进行瞬态校准使用最多的三种装置是机械式碰撞装置、电磁能释放装置和霍普金斯棒装置，校准方法有三种绝对校准法和两种比较校准法。近年来由于高速数字计算机被广泛采用，快速傅里叶变换比较校准法能处理大量的数据，分析速度快，准确度高，已经成为振动冲击传感器瞬态校准使用最广泛的方法。

振动冲击传感器瞬态校准的周期一般为一年，对使用频率较高的传感器校准周期应缩短。通常传感器与配套使用的放大器、滤波器、电缆等应该一起进行校准，以保证准确度。

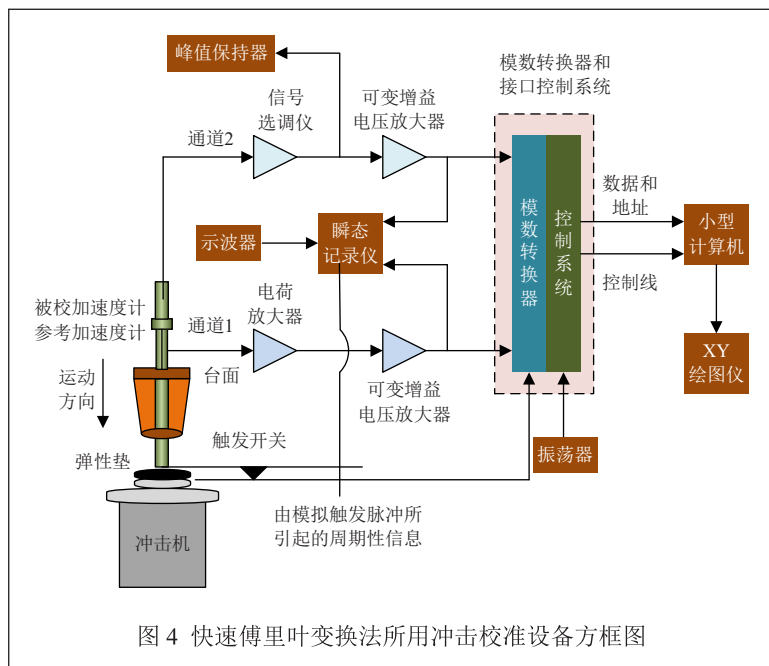


图 4 快速傅里叶变换法所用冲击校准设备方框图

参考文献

- [1] 赵圣战, 毕文辉. 振动测试传感器的选择和使用 [J]. 仪器仪表用户, 2011, 18(1): 87-89.
- [2] 范秋涛, 王铁玲. 加速度传感器的冲击校准 [J]. 计量与测试技术, 2005, 32(9): 6-7.
- [3] 李素敏. 冲击攻丝系统中高聚物材料缓冲性能的研究 [D]. 昆明理工大学, 2004.
- [4] 景鹏. 高 g 值冲击测试关键技术研究 [D]. 中北大学, 2009.
- [5] 夏伟强. 高冲击加速度测试系统的校准研究 [D]. 中北大学, 2007.

Transient Calibration Device and Method of Vibration Shock Sensor

BI Wen-hui

(92493 Army 60 Unit, Huludao 125000, China)

Abstract: Vibration and shock is a widespread phenomenon in nature, serious vibration and shock endanger the safety of human life and weaponry. In order to prevent these hazards from happening, higher requirements are placed on vibration and shock in actual engineering. The correct calibration of the sensor directly affects the accuracy and reliability of the vibration and shock results, and the transient calibration of the sensor has a more serious impact on the results. At present, mechanical collision device, electromagnetic energy release device and Hopkins rod device are widely used in the transient calibration of vibration shock sensor. This paper introduces the structure, working principle, absolute calibration and relative calibration of these three devices in detail.

Key words: Vibration shock; sensor; transient calibration

作者简介

毕文辉: 92493 部队 60 分队, 硕士研究生, 高工, 主要从事武器装备及其检测仪器仪表的计量测试与管理。

通信地址: 辽宁省葫芦岛市海滨南路 1 号 92493 部队 60 分队

邮编: 125000

邮箱: wenhuibi@sina.com