

Calibration method and Introduction of the Piezoresistive Accelerometer in Crash Test

Xin CHEN, Jianyong MA, Jiayi WENG, Haijian DING

Safety test and virtual dept., SAIC Motor Technical Canter, Shanghai, China

Email: chenxin01@saicmotor.com; majianyong@saicmotor.com; wengjiayi@saicmotor.com; dinghaijian@saicmotor.com

Abstract: Introduce the Piezoresistive Accelerometer. The calibration method is built as a back to back method which is according to the Specification of the piezoresistive acceleration sensors and combined with relevant standards and calibration equipments. Then the accuracy and the credibility of the vehicle safety test data will be further ensured. Through the introduction of the Specification of the acceleration sensors used in the vehicle safety test, the piezoresistive acceleration sensors choosing method is highly recommended to be used in the vehicle crash safety test.

Key words: Piezoresistive; Accelerometer; Calibration; Crash test

压阻式加速度传感器校准方法及整车碰撞中的应用

陈 歆，马建永，翁佳怡，丁海建

上汽技术中心，上海，中国，201804

Email: chenxin01@saicmotor.com; majianyong@saicmotor.com; wengjiayi@saicmotor.com; dinghaijian@saicmotor.com

摘 要：压阻传感器的介绍，根据压阻式加速度传感器的参数特点，结合相关标准及校准设备，建立了一套背靠背为原理的校准方法。从而进一步保证整车碰撞试验数据的准确度，从而提升碰撞试验的可信度。通过整车碰撞试验中加速度传感器的特性介绍，推荐了在整车碰撞试验领域中压阻式加速度传感器的选用方法。

关键词：压阻式；加速度传感器；校准；整车碰撞

1 概述

2013 年以来，我国宏观经济形势基本稳定，保障了汽车市场的平稳增长。我国正在着力扩大内需、推进新型城镇化。经济将持续增长，居民收入水平也将不断提升，这些都为汽车市场提供了稳定发展基础。2015 年上半年汽车产销均保持了超过 3% 的增长率，继续呈现出相对较大的增长趋势。2015 年全年我国汽车产销或将超过 2435 万辆，在这样的形势下，汽车生产厂商纷纷加大对新产品开发的投入并加快新产品的研发进程。随之而来的汽车研发中的碰撞试验数量也不可避免的增长。汽车碰撞试验主要分为模拟试验和实车试验。模拟试验就是在试验台上模拟汽车碰撞事故来进行试验的，例如：安全带动态试验、儿童座椅动态试验、门锁门铰链动态试验等等。实车碰撞是用真实汽车整体进行碰撞，这种试验方法能真实反映汽车碰撞的综合指标，例如：全宽碰撞试验、移动壁侧面碰撞试验、两车相撞、翻车试验等等。汽车碰撞时产生的冲击力不仅幅值大，而且数据十分复杂。在碰撞的瞬间冲击力的波形与碰撞的速度、相撞双方的质量分布、接触处的形状、材料、变形等等因素相关。因此在试验中，需要采集，力、加速度、位移、扭矩、角度等物理量以用于研发分析。在车身及车内假人体内按要求布置各类传感器。其中，以压阻式加速度传感器所占比例最大。早期的加速度传感器只能实现单轴的线加速度或角加速度的测量；随着传感技术、半导体技术、计算机技术等发展，能实现多维测量的传感器，尤其是各种加速度传感器已趋于成熟，其性能也有了很大提高。加速度传感器按原理不同，可分为电压式、压阻式、压电式、电容式等等。压阻式加速度传感器具有灵敏度高、线性度好、频响高、外接电路简单，体积小，质量轻，易安装，无活动部件，可靠性高，能应用

于振动、冲击、腐蚀、强干扰等恶劣环境，适于动态测量。成为汽车碰撞试验领域的首选传感器。但由于传感器的反复使用，且使用条件差，在试验过程中承受过载使灵敏度系数容易发生偏移。因此，为保障碰撞试验数据的可靠性，必须定期对压阻式加速度传感器进行校准。

2 压阻式加速度传感器介绍及选用。

2.1 选择合适的加速度传感器

对于多数工程师来说，选择合适的传感器将会对测试结果产生很大的影响。压阻式加速度传感器是一种广泛应用的直流响应加速度传感器，不同于其他型加速度传感器，应变压阻式加速度传感器的敏感芯体为半导体材料制成电阻测量电桥，其结构动态模型仍然是弹簧质量系统。通过应变电阻值的变化输出加速度信号，应变电阻是传感器惯性感应系统的一部分。现代微加工制造技术的发展使压阻形式敏感芯体的设计具有很大的灵活性以适合各种不同的测量要求，在灵敏度和量程方面，从低灵敏度高量程的冲击测量，到直流高灵敏度的低频测量都有压阻形式的加速度传感器。压阻式加速度传感器测量频率范围可覆盖从直流信号到具有刚度高、频率范围至几十千赫兹的高频信号。超小型化的设计也是压阻式传感器的一个亮点，大多说的压阻式传感器对温度变化敏感，因而需要对输出信号在传感器内部和外部做温度补偿。在价格方面，大批量使用的压阻式传感器成本价具有很大的市场竞争力，但对特殊使用的敏感芯体制造成本将远高于压电型。

压阻式加速度传感器采用单晶硅作悬臂梁，在上下两面粘接两个应变片。当梁的自由端的质量块受到加速度作用时，在梁上应变片受到弯矩和应力，使电阻值发生变化。电阻相对变化与加速度成正比。由两个电阻组成的电桥将产生与加速度成正比例电压输出。其内部结构图见图 1

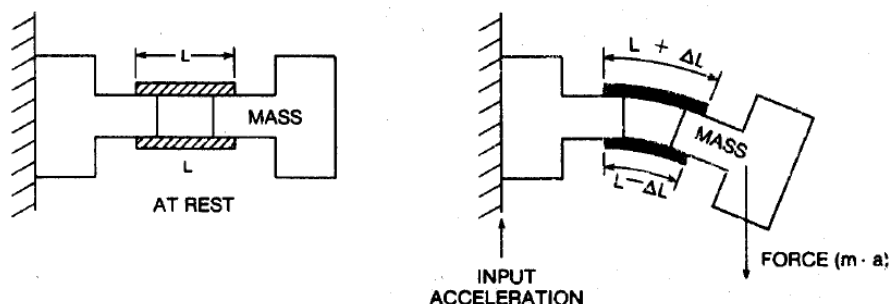


Figure1: The inside structure of the Piezoresistive Accelerometer

图 1. 压阻式加速度传感器内部结构图 1

由于压阻变化一般都很小，要把微小压阻变化引起的微小电阻值变化测量出来，同时要把电阻相对变化转化为电压变化，因此压阻式加速度传感器一般还内置测量电路。最典型为直流电桥电路（见图 2、半桥差动电路（见图 3）、

恒流源电桥（见图 4）半桥式电路（见图 5）全桥式电路（见图 6）。桥路主要指标是桥路灵敏度、线性等指标。

¹ 《传感器原理 设计与应用》- 国防科技大学出版社

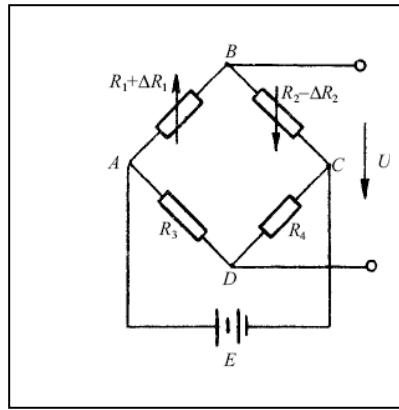


Figure 2: Direct current bridge circuit

图 2: 直流电桥电路

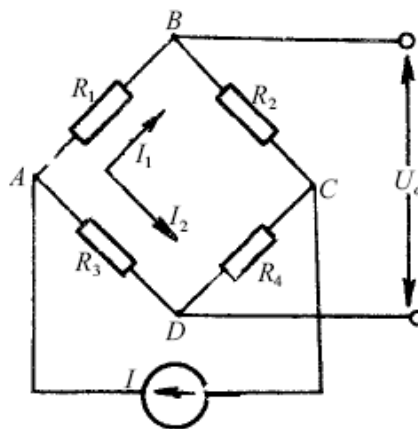


Figure 3: Half-bridge differential circuit

图 3. 半桥差动电路

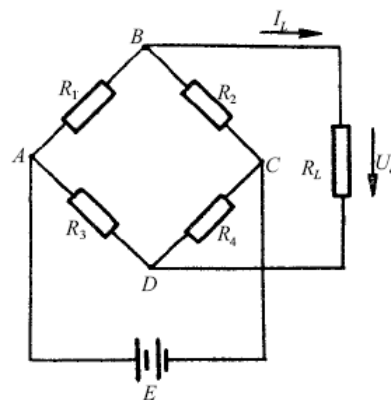


Figure 4: Constant-current source bridge circuit

图 4. 恒流源电桥电路 2

半桥式电路，如图 5 所示， $V_{out} = \frac{R_2 - \Delta R}{R_1 + R_2} \times V_{app}$

² (图 2、3、4 《传感器原理 设计与应用》 - 国防科技大学出版社)

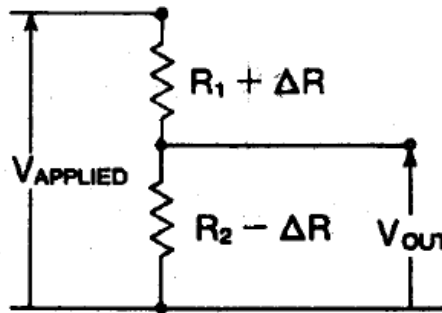


Figure 5: Half-bridge circuit

图 5. 半桥式电路

全桥式电路，如图 6 所示， $E_{out} = \left\{ \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_2 - \Delta R}{R_1 + R_2} \right\} \times V_{app}$

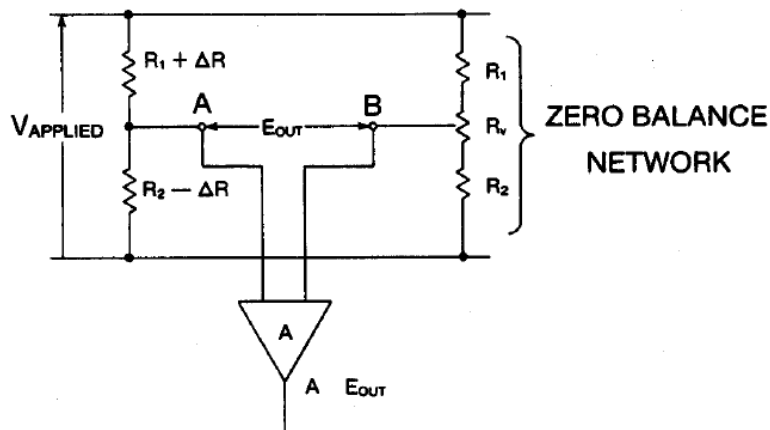


Figure 6: Full-bridge circuit

图 6. 全桥式电路

此外，可以根据实际应用需要，增加一些特性，比如过载限制功能及阻尼特性。

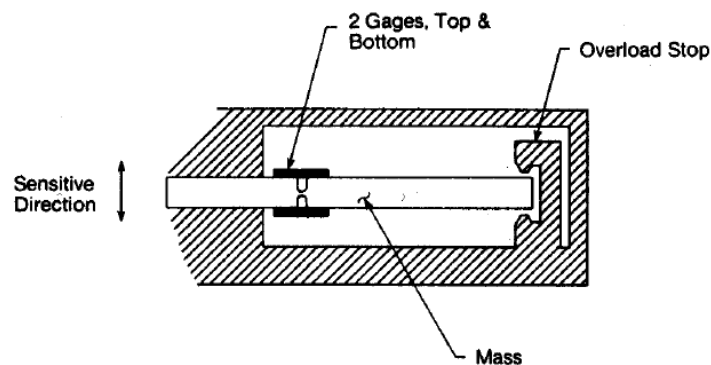


Figure7: Piezoelectric accelerometer with overload limiter

图 7. 带过载限制器的压阻加速度传感器

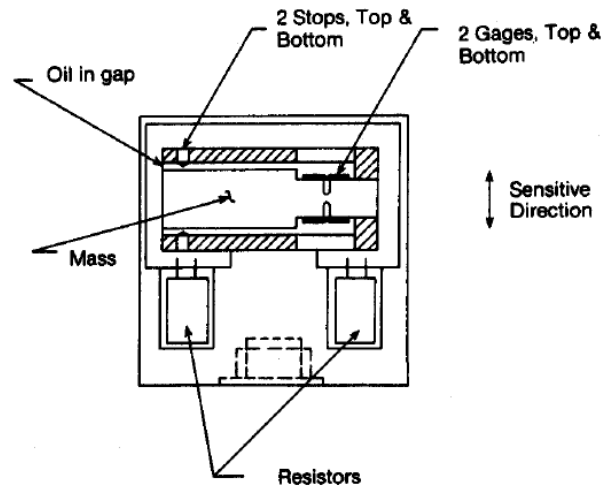


Figure 8: Piezoelectric accelerometer with damper

图 8: 带阻尼器的压阻加速度传感器

3. 压阻式加速度传感器的参数定义

3.1 灵敏度

加速度传感器灵敏度越高越好。灵敏度越高传感器所能感知的加速度变化量越大，即被测加速度量稍微有些微小变化，传感器就有比较大的输出。

3.2 横向灵敏度

当灵敏度高时，与测量信号无关的外界噪声也容易混入。与传感器敏感轴垂直的任意方向收到震动激励时，传感器获得的信号输出量越小越好。因此，需传感器信噪比相对大。还需保证各轴之间交叉灵敏度越小越好。

3.3 响应特性

频响特性必须在所测频率范围内不失真，同时注意延时时间越短越好。

3.4 阻尼系数

阻尼系数为 0.070 时振幅特性比较平坦，在整车碰撞过程中，要求阻尼系数为 0 或者趋近于 0 为好。

3.5 线性度

多轴加速度传感器都有一定线性范围，在线性范围内输入与输出成比例关系。线性范围越宽，传感器工作量程越大。

3.6 稳定性

多轴加速度传感器经过使用后，其输出特性不发生变化的能力。碰撞试验环境条件相对恶劣，温度、冲击、油污等会产生一定干扰。必须优先考虑稳定性因素。

目前，典型的碰撞试验用多轴加速度传感器有美国 ENDEVCO 生产 7264 系列和 MESA 生产的 M64 系列。主要技术指标见表 1。

Table 1 the Accelerometer parameters for the typical crash tests

表 1 典型碰撞试验用加速度计参数

系列	M64-2000		7264C		M64-200	
典型灵敏度	0.15mV/g		0.2mV/g		0.9mV/g	
横向灵敏度	1%		1%		1%	
频率范围	0-2000Hz	±2.5%	0-2000Hz	±2%	0-800Hz	±2.5%
	0-5000Hz	±10%	0-5000Hz	±5%	0-2000Hz	±5%
线性度	±1%		±1%		±1%	
阻尼系数	无阻尼		无阻尼		无阻尼	
幅值范围	(0~2000) g		(0~2000) g		(0~200) g	

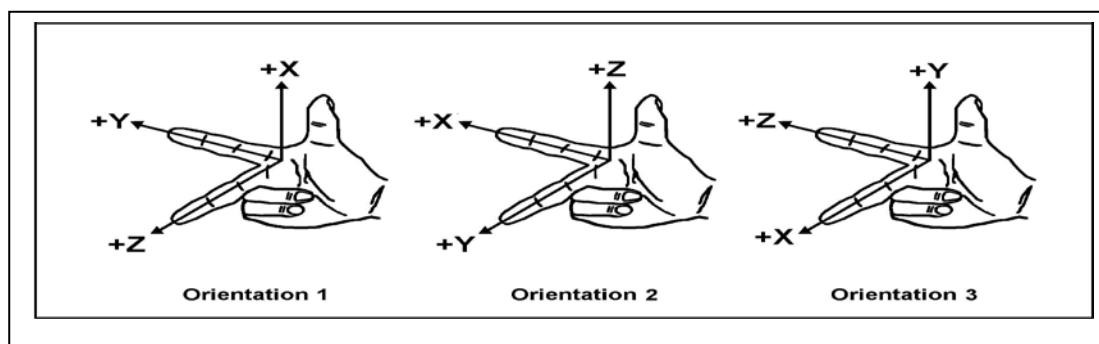


Figure 9:
The three
possible
coordinate
systems
which can
be built by
three single

Accelerometers.

图 9: 三个单轴加速度计可能建立的三种坐标系 3

4. 压阻式加速度传感器校准方法。

4.1 校准原理：

目前一般压阻式加速度计所采用的校准方法分为比较校准法和绝对校准法两种。比较法校准是工程中最常用的校准方法，当检定频率大于 5kHz 时，使用制造商推荐的扭矩值，将被检加速度传感器背靠背刚性地安装在振动台台面中心位置，或将其与振动台内装传感器同轴安装。当检定频率小于 5kHz 时，将被检加速度传感器装在振动台面上附加固定装置内的参考加速度传感器同轴安装。采用同样加速度 a 激励它们，在相同的激励条件下，根据已知的标准传感器输出响应，通过比较的方式求出被测传感器的响应。绝对校准方法又称激光绝对测量法，通过对长度、频率等量的测量，来准确测定振幅、速度、加速度等量，从而对传感器进行校准。常用于标定高精度传感器或标准传感器，具体有包括条纹计数法、贝塞尔函数法和正弦逼近法等。

根据上汽技术中心现有的标定条件及所使用的传感器都为工作型加速度传感器，采用比较法进行校准。比较法校准的操作简便，对振动、冲击和环境的要求相对较低，校准时间较短，而且能直接导出标定报告。但必须采用性能良好的标准传感器、放大器，以保证校准的不确定度。校准压阻加速度传感器主要从振动和冲击两方面着手。在振动加速度校准方面采用比较法振动标准装置，它包括符合规定要求的振动激励系统、频率测量系统、标准振动传感器及其配套用的信号适调仪器和指示仪器，用比较测量法向被校准传感器传递振动量值。改变振动频率和振动参数的幅值，可得到被校传感器的幅频特性和幅值线性度，分析轴向间干扰、合成加速度。在冲击加速度的比较法校准方面，采用 POP 冲击台方法进行激励，适用于不同的持续时间和加速度范围。

4.2 校准设备及环境要求

³ (碰撞试验仪器第一部分 电子仪器—美国汽车工程师协会 J211/1 2007)

4.2.1 校准环境条件:

采用比较法温度为 $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$,采用绝对法温度为 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度不大于 75%。实验室及周围环境应无震动和冲击源,无强磁场、强电场、强声场的干扰。

4.2.2 激励信号发生器:

产生振动信号,可以自动控制振动频率和幅值,频率范围尽可能宽。

4.2.3 功率放大器:

将信号发生器产生的信号进行放大以驱动振动器等激励源,功率放大器的失真率要小于 0.05%;

4.2.4 激励源:

根据放大的振动信号进行振动,从而产生校准所需要的激励源,激励源本身共振频率高达 40KHz;

4.2.5 参考传感器:

作为一个标准来比对被测传感器,通常用石英作为感应材料,建议每年至少标定一次;参考传感器应尽可能考虑与放大器一起校准。参考传感器套组参考灵敏度校准不确定度为 0.5% ($k=2$),灵敏度频率响应范围优于 2%,线性度优于 3%,年稳定度优于 3%。

4.2.6 信号调理器:

将传感器产生的信号进行信号调理放大。精度 0.5%, 带宽 100KHz. 可以处理多种传感器为宜。

4.2.7 电脑控制器:

系统控制单元并将模拟信号数字化,带宽 10M,分辨率 16 位。

4.2.8 动态信号分析仪:

频率范围 20Hz~10kHz, 最大允许误差 $\pm 0.1\%$

4.2.9 示波器:

检查传感器信号的波形。频率范围 1Hz~10kHz, 最大允许误差 $\pm 0.1\%$

校准示意图: 见图 10

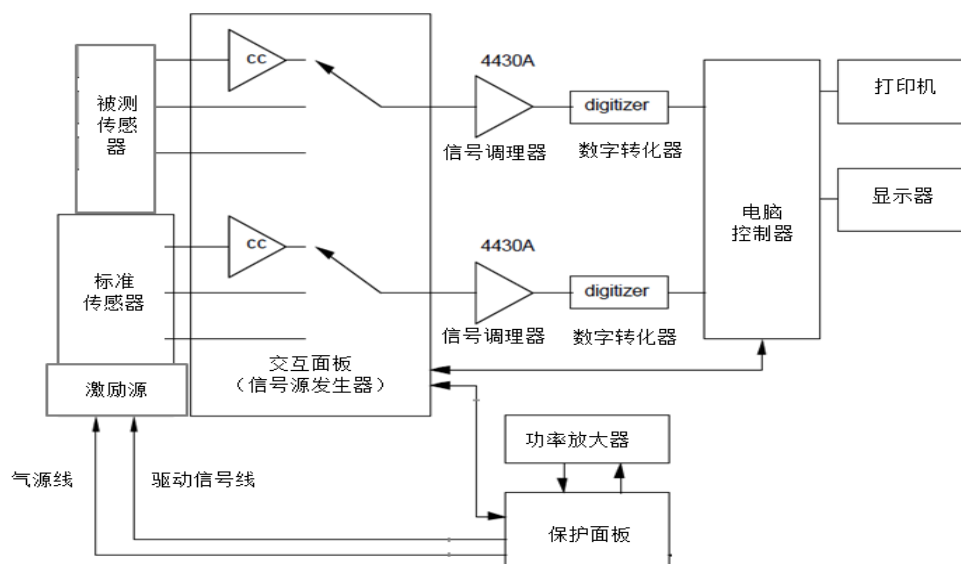


Figure 10: The schematic diagram of the calibration of the crash test accelerometer

图 10: 碰撞试验用压阻式加速度传感器校准示意图

5.主要校准参数及方法

5.1 外观检查

被校加速度传感器壳体上应标出型号、出厂编号、商标、以及整栋灵敏度方向，加速度传感器壳体上应无明显的机械损伤。

5.2 参考灵敏度校准

将被校传感器需标定轴向方向与参考标准加速度计背靠背刚性地连接在一起，安装在校准激励台的台面中心，在参考频率（160Hz）和参考加速度（10 g）下进行校准，被校传感器的电输出与所承受的加速度值之比即为参考灵敏度。需要时应测量量值加速度计的输出比。

被检加速度传感器灵敏度 S_2 按下式计算

$$\text{即：} \quad S_2 = \frac{X_2}{X_1} S_1 \times 100\%$$

式中 S_1 ：参考加速度传感器灵敏度

X_1 ：参考加速度传感器输出值

X_2 ：被测加速度传感器输出值

5.3 年稳定性校准

加速度传感器灵敏度的稳定度通常以年稳定性来衡量，即正常使用的传感器在相同校准情况下，其灵敏度的逐年变化情况。

$$\text{即：} \quad a = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100\%$$

式中 a ：年稳定度；

S_2 ：当年校准的灵敏度；

S_1 ：上一年校准的灵敏度。

5.4 幅频响应校准

灵敏度频率响应可采用震动连续扫描法按均匀地选取 7~12 个点选定的频率范围内（参考加速度：10g），用比较法测出不同频率下的灵敏度，灵敏度响应参考如图

5.5 幅值线性度校准

按各轴轴向方向分别校准各轴幅值线性度。可根据用户需要采用振动或冲击的激励方法。在实际使用加速度幅值范围里选择 5~7 个点，进行灵敏度幅值线性度的校准。

6 总结

随着我国汽车安全性技术日趋成熟和完善，碰撞试验被广泛地用于研发、标准、法规、新车评价、被动安全系统开发中去。压阻式多轴加速度传感器为碰撞试验中使用最多、最典型、新型的传感器，本文试对压阻式多轴加速度传感器的特性作了介绍，并结合其特点对校准方法做了初步探讨，希望以此提升碰撞试验数据可信度，为汽车被动安全试验提供基础性保障。

7 主要参考文献：

- [1] 席占稳.压阻式硅微型加速度传感器的研制[J].传感器技术, 2003, 22(8): 31-35.
- [2] Instrumentation For Impact Test-Part 1-Electronic Instrumentation-SAE J211/1 2007 碰撞试验仪器（第一部分：电子仪器）-[S] THE SAE SAFETY TEST INSTRUMENTATION STANDARDS COMMITTEE 美国汽车工程师协会安全测试设备标准委员会 J211/1 : 2007
- [3] Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer 《振动和冲击传感器的校准方法 第 21 部分：与基准传感器进行比对的振动校准》-[S] Technical Committee ISO/TC108 国际标准化组织技术委员会 ISO/TC108, Mechanical vibration and shock, Subcommittee SC3 机械冲击和振动分支委员会 SC3, ISO 16063 -21: 2003
- [4] Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer 《振动和冲击传感器的校准方法 第 22 部分：与基准传感器进行比对的冲击校准》-[S] Technical Committee ISO/TC108 国际标准化组织技术委员会 ISO/TC108, Mechanical vibration and shock, Subcommittee SC3 机械冲击和振动分支委员会 SC3, ISO 16063 -22: 2005