

# Evaluation and Testing of a Domestically Produced Artificial Acceleration Sensor

Kai WANG<sup>1,2</sup>, Huishan LIAO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dept. Crash test, CATARC, Guangzhou, China

<sup>2</sup> HNU College of Mechanical and Vehicle Engineering, Changsha, China

Email: wangkai@catarc.ac.cn

**Abstract:** Acceleration sensors are indispensable products in automotive collision safety testing. Currently, the commonly used 7264C-2K and 64-2K sensors in the industry have high costs, large losses, and long procurement cycles, resulting in high testing costs. This test evaluates an independently developed accelerometer based on MEMS piezoresistive design, with an in band flatness of  $\pm 5\%$  and a bandwidth of 6KHz. The shock limit can reach 10000g, meeting technical parameter requirements. At the same time, it has low cost and long service life, and can be used to replace imported accelerometers, effectively reducing production costs for enterprises.

**Keywords:** MEMS piezoresistive sensor; Accelerometer; Head drop test

## 一款假人用国产加速度传感器评估测试

王凯<sup>1,2</sup>, 廖慧珊<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中汽研汽车检验中心（广州）有限公司，广州，中国，511340

<sup>2</sup> 湖南大学机械与运载工程学院，长沙，中国，410000

Email: wangkai@catarc.ac.cn

**摘 要:** 加速度传感器是汽车碰撞安全测试中不可缺少的产品，目前行业内常用的 7264C-2K 与 64-2K 传感器造价高、损耗量大、采购周期长，导致试验成本高。本次测试评估一款自主研发的基于 MEMS 压阻式设计的加速度传感器带内平坦度在 $\pm 5\%$ 范围内带宽为 6KHz，冲击极限可达到 10000g，满足技术参数要求，同时其造价成本低，使用寿命长，可用于替代进口的加速度传感器，有效地降低企业生产成本。

**关键词:** MEMS 压阻式传感器；加速度计；头部跌落试验

### 1 引言

汽车是目前生活中最普及的交通工具之一，汽车碰撞安全的意义在于通过科学的测试和评估，提高汽车产品的安全性能，减少交通事故中的人员伤亡和财产损失。加速度传感器被应用于碰撞测试中测量车身加速度和假人加速度。与一般用途的加速度传感器相比，汽车碰撞测试用传感器需满足更为严格的技术标准，即符合《SAE J211-AUG2009》的规定。该标准要求，用于碰撞测试的传感器其谐振频率需超过 20kHz，零点温漂每摄氏度不得超过满量程的 0.25%，最小频率响应为 3.5kHz，非线性度需小于 1%。这些要求是普通加速度传感器难以达到的<sup>[1]</sup>。

目前，汽车碰撞试验中主要使用的 MEMS 压阻式加速度传感器被美国的 ENDEVCO 公司和 MEAS 公司所垄断。以 ENDEVCO 公司的 Model 7264-2000 系列和 MEAS 公司的 Model 64-2000 系列为代表，这两种传感器的谐振频率分别为 28kHz 和 26kHz，带宽内的平坦度在 $\pm 5\%$ 以内，均为 5kHz<sup>[2]</sup>。此类传感器在碰撞试验中易受

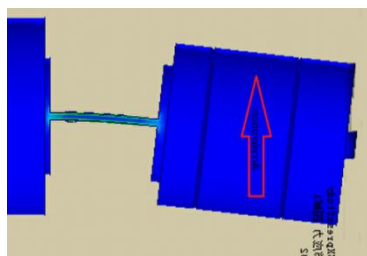
损，且价格高昂，导致大量使用时试验成本居高不下。本文旨在开发一款应用于假人身上的压阻式加速度传感器，通过频域分析、温度测试等方法研究该款传感器的动态范围、线性范围和热稳定性等基本性能，并通过 Hybrid III 假人头部跌落试验和传感器可靠性检测，研究该传感器应用于汽车碰撞领域假人相关测试的适应性和可靠性。

## 2 传感器设计及评估方法

### 2.1 压阻式加速度传感器工作原理

MEMS 压阻式加速度传感器因体积小、频响宽泛、接口电路简便而在碰撞测试中得到了广泛应用。本次设计的加速度计同样基于压阻原理。压阻式传感器的工作原理是利用单晶硅的压阻效应，即在施加压力或拉力时，硅晶体的晶格间距发生变化，从而使禁带宽度发生变化，此变化导致各能谷中的电子重新分布，因而使载流子的迁移率也发生变化，这样就使电阻率发生了变化，而其电阻率的相对变化与应力呈正比<sup>[3][4]</sup>。电阻值的相对变化 $\Delta R/R$  与应力之间的关系满足

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma$$

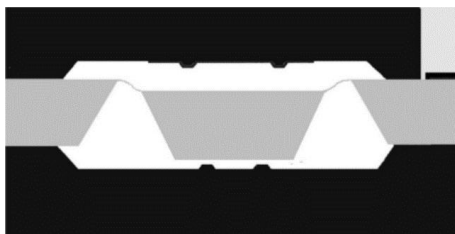


式中： $\Delta \rho$  为电阻率的变化量； $\rho$  为电阻率； $\pi$  为压阻系数； $\sigma$  为应力。

Figure 1. Schematic diagram of MEMS monocrystalline silicon piezoresistive sensor

图 1. MEMS 单晶硅压阻传感器原理图

MEMS 压阻式加速度传感器一般采用梁—质量块结构形式，由硅梁、质量块和分布在硅梁上的压敏电阻构成，梁的自由端与质量块相连，另一端为固支端，压敏电阻制作在梁上，当加速度作用于质量块产生位移时，梁受到弯矩作用产生应力，由于压阻效应，应力将会引起压敏电阻阻值发生变化，通过检测压敏电阻阻值的变化来检测加速度的大小<sup>[5]</sup>。以 ENDEVCO 公司的 Model 7264-2000 系列传感器为例，采用单悬臂梁的结构方案（示意图参考如下图 1 的压敏电阻与电路板上面的半桥电阻（固定电阻）连接成惠斯通电桥，给电桥施加激励，



通过测量惠斯通电桥输出的电压值变化便可得到待测加速度信号。

Figure 2. Structural diagram of sensor double cantilever beam

图 2. 传感器双悬臂梁结构简图

本次设计的传感器则采用双悬臂梁的结构方案（示意图参考如图 2），双梁上的压敏电阻直接连接成惠斯通电桥，给电桥施加激励，通过测量惠斯通电桥输出的差分电压值变化便可得到待测加速度信号。双悬臂梁结

构显著提高了传感器的抗冲击能力，大冲击的工况下传感器不容易损坏；另外该结构增加了传感器的横向结构强度，从而降低了横向灵敏度值，这点对于碰撞假人加速度传感器的横向灵敏度要求（<1%）尤其重要。

## 2.2 碰撞安全测试用假人传感器设计要求：

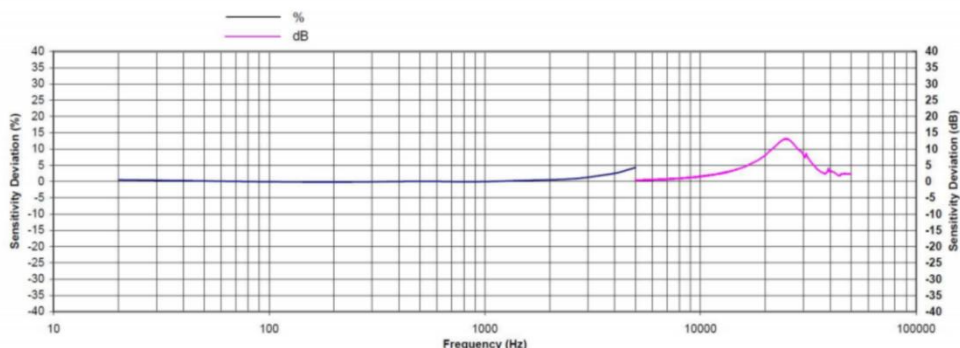
应用于汽车碰撞试验中的假人专用传感器应满足 SAE-J2570 的法规要求，法规中对加速度计性能规格的指标是传感器性能和适用范围的重要影响因素<sup>[6]</sup>。以下是本次评估测试样本传感器的指标描述：

最小频率响应：3.5KHz，在所规定的传感器频率响应幅值误差（ $\pm 5\%$ ）内传感器所能测量的最低频率信号。

非线性度：小于 1%，传感器输出读数与终端线的最大偏差，通常用读数的百分比表示。终端线定义为连接传感器空载读数和满量程读数的直线。

温度对输出绝对值的影响：每摄氏度小于 0.1%，由于传感器温度变化引起的输出变化，以每摄氏度变化的读数百分比表示。

温度对零点的影响：每摄氏度小于满量程的 0.25%，传感器温度变化引起的零点平衡变化，以每摄氏度变化占满量程范围的百分比表示。



横向灵敏度系数（绝对值）：应在 $\pm 1\%$ 范围内，敏感轴因垂直于该轴施加的任何加速度而产生的输出，用施加加速度的百分比表示。

Figure 3.frequency response test

图 3. 频率响应测试

## 3 假人用加速度传感器性能测试

### 3.1 基本性能测试结果

#### 3.1.1 动态范围更宽

当传感器受到冲击脉冲时，MEMS 加速度计提供最佳的阻尼量，以实现最大的共振控制，并且仍然保持各种行业法规(如 SAEJ211 和 ISO-6487)所要求的最广泛的频率响应。

#### 3.1.2 线性范围更宽

与大多数加速度传感器设计相比，压阻 MEMS 加速度计的低频相应好，在 $\pm 5\%$ 范围内的带内平坦度可以达到 6KHz，提供了更耐用的结构和更宽广的线性范围。

Table 1. Test the impact calibration coefficient of the sensor

表 1. 测试传感器冲击标定系数

加速度 (g)	灵敏度系数(mV/g)	冲击输出(mV)	非线性误差(mV)	误差
502.8963	0.153128	77.01	80.65	-0.06%
999.8514	0.153329	153.31	154.91	0.07%
1502.173	0.152073	228.44	229.97	-0.75%
1502.173	0.152073	228.44	229.97	-0.75%
1502.173	0.152073	228.44	229.97	-0.75%
1996.612	0.153219	305.92	303.85	ref
2509.271	0.15266	383.07	380.46	-0.36%
2998.69	0.15318	459.34	453.59	-0.03%
4006.545	0.152108	609.43	604.19	-0.73%
4996.551	0.15122	755.58	752.12	-1.30%
6007.121	0.148796	893.84	903.13	-2.89%

### 3.1.3 热稳定性好;

跟市面上同类型的传感器相比，此次设计的传感器凭借更高的表阻抗和全桥结构，与同类型传感器相比消耗的功率更少，产生的热量也更少。因此传感器具有更好的热稳定性和更短的响应时间。

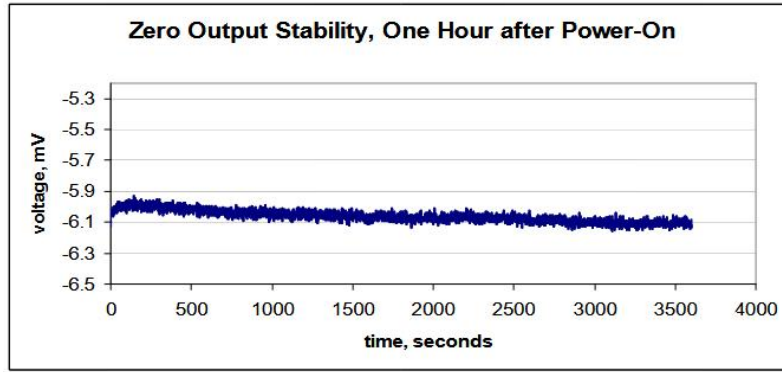


Figure 4. Sample zero temperature drift test

图 4. 样品零点温漂测试

## 3.2 假人测试标定结果

为验证该款传感器在假人测试上的准确性，本次比对测试使用已广泛应用于碰撞行业的 ENDEVCO 品牌，型号为 7264C-2K 的传感器做参照组，设计传感器为试验组，分析两组传感器在 HybridIII 50th 假人头部跌落试验数据，比对合成加速度曲线和数据。

试验依据 SAE J2856 标准中的头部跌落测试要求，采用 HybridIII 50th 假人头部模型，设计了一套具体的试验方案：试验使用 HybridIII 假人头部总成，按照图 5 设定的方法进行悬挂，确保假人头部中央对称面垂直。通过调整悬挂线索，使假人额头最低点低于鼻子最低点 12.7mm。为控制跌落接触位置的差异导致的误差，规定了碰撞点需位于假人头部划定的特定区域。在每次试验开始前，假人头部总成需在温度 21.3 至 23.2℃，湿度 59% 至 69% 的环境中预置至少 4 小时，并在相同环境下进行试验。试验准备阶段，需用酒精清洁假人头部的碰撞表面。准备就绪后，从 376mm 的高度让头部总成自由跌落至刚性平面。此外，同一假人头部的连续标定试验间隔时间不得少于 3 小时<sup>[7]</sup>。通过分析两组传感器在假人头部跌落试验中获取的数据，本研究对比了合成加速度曲线和数据，以验证传感器的准确性。

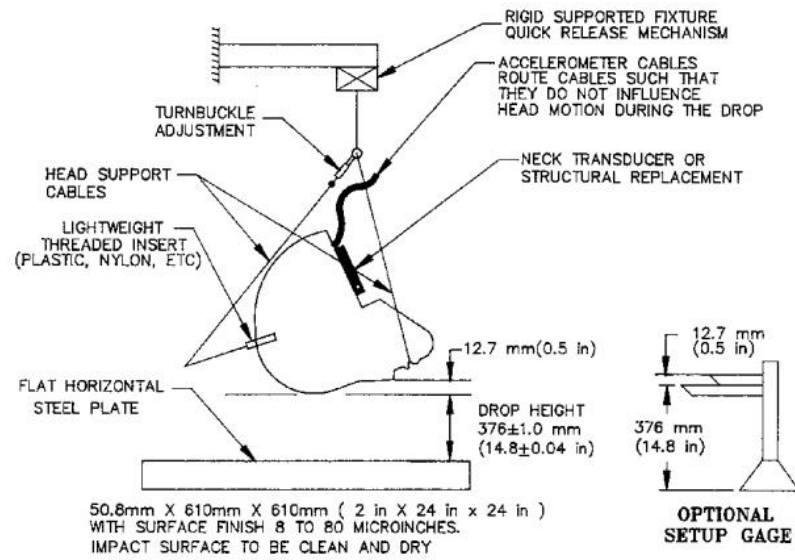


Figure 5. Head drop test  
图 5. 假人头部跌落试验

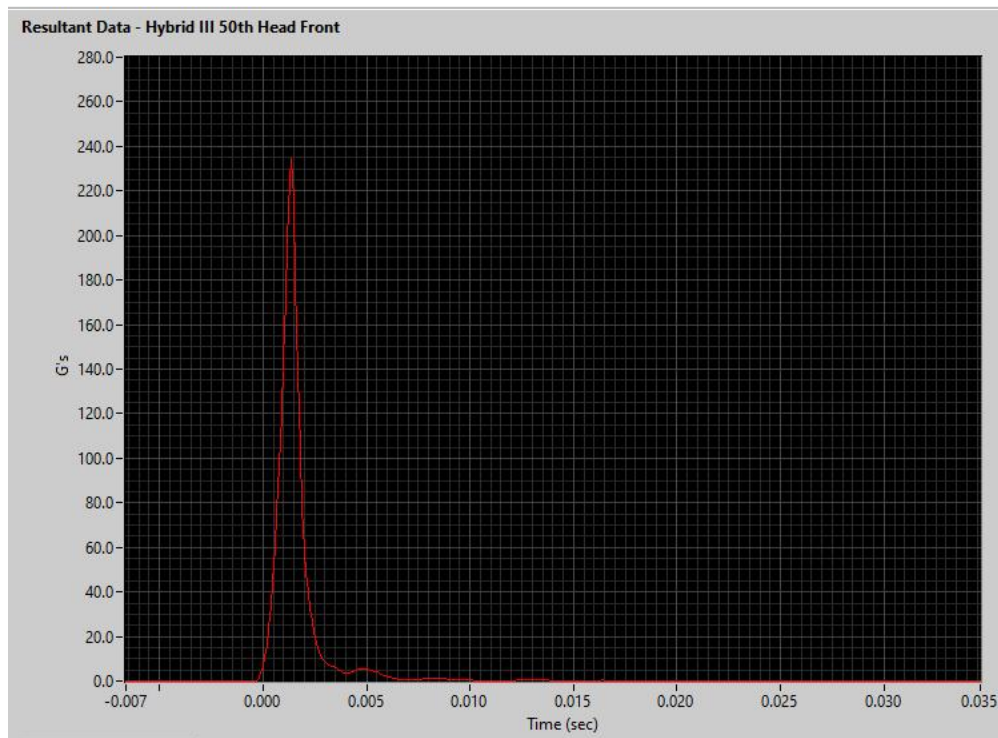


Figure 6. ENDEVCO Model 7264-2000  
图 6. ENDEVCO Model 7264-2000

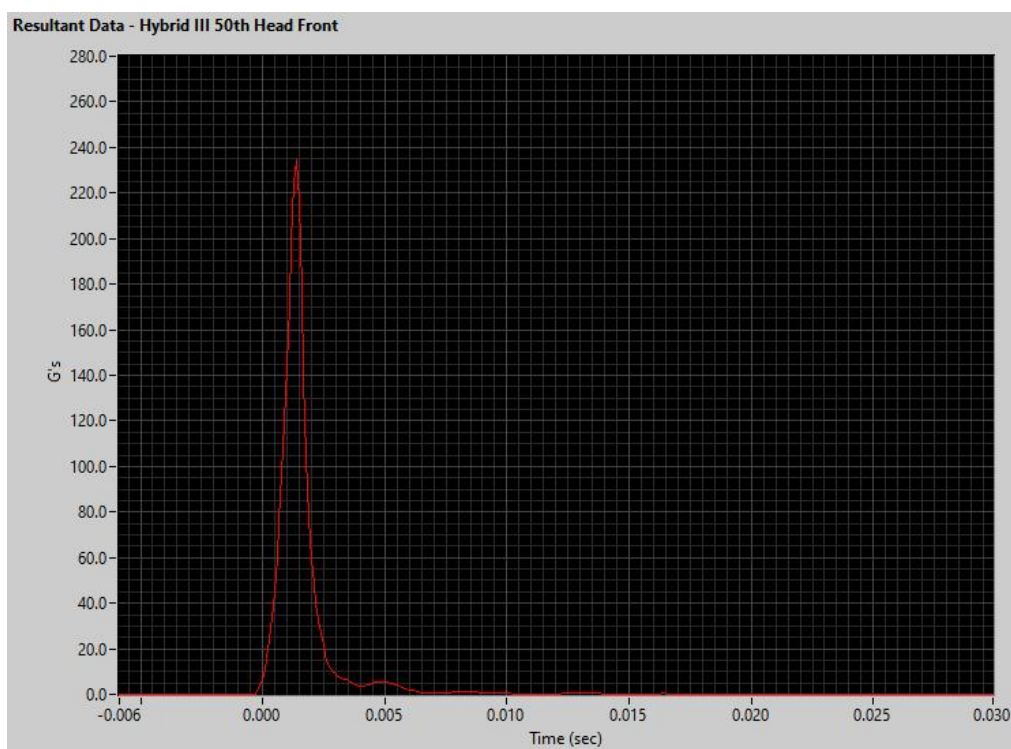


Figure 7. Testing sensors

图 7. 测试传感器

通过分析比对多次试验数据曲线与恩德福克加速度一致，由于前额与标定台接触位置具有不确定性，合成加速度相差小于 5%，两种传感器测试曲线高度重合，因此该款测试传感器满足试验要求。

### 3.3 传感器可靠性测试结果

传感器可靠性测试是保证其性能与稳定性的关键环节，通过可靠性测试，可以评估传感器在各种环境和使用条件下的性能表现，确保在实际应用中能够稳定工作。本次采用冲击耐受冲击测试、电缆抗拉测试、输出漂移测试对传感器进行可靠性验证。

#### 3.3.1 冲击耐受冲击测试：

将样品传感器以及参考传感器靠近安装在跌落平台上，整体做跌落试验（验证传感器的准确性，由于安装问题，样品传感器方向反向），以下图 8 中的方式安装。



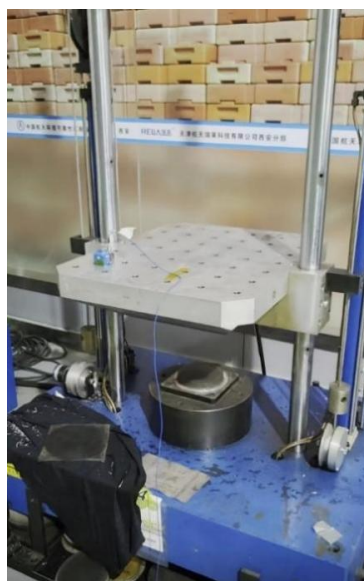
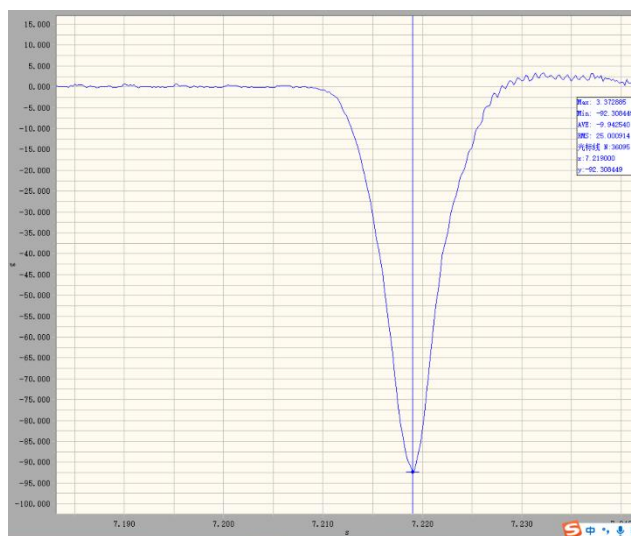


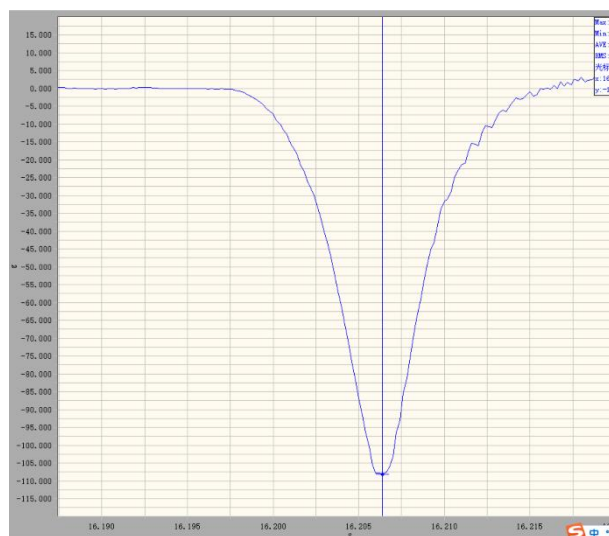
Figure 8. Sensor installation method

图 8. 传感器安装方式

按照汽车碰撞测试的常见加速度幅值以及波形加载跌落高度，对传感器进行多次冲击，如图 9 所示。加速度值分别为：~90g，~100g，~200g，~1000g。



加速度为 92.3g



加速度为 108.1g



加速度为 231.2g



加速度为 1245g

Figure 9. Acceleration curves of drop test

图 9. 跌落加速度曲线

冲击耐受测试结果：

(1) 通过多次跌落台试验：~90g，~100g，~200g，~1000g，每种加速度中心值附近冲击 25 次，一共 100 次冲击。最终测量传感器的输出电阻正常，电桥平衡，动态性能基本不变。

(2) 为保证冲击前后传感器的性能满足要求，对冲击前后对被测传感器进行校准测试：

序列号	冲击前灵敏度(mV/g)	冲击后灵敏度(mV/g)	漂移量
样品 1	0.139	0.141	1.43%
样品 2	0.163	0.166	1.84%
样品 3	0.12	0.121	0.83%

灵敏度漂移值均小于 2%，满足标准要求。

序列号	冲击前零点(mV)	冲击后零点(mV)	漂移量(mV)
样品 1	-16.39	-15.88	0.51
样品 2	2.79	3.26	0.47
样品 3	6.33	5.18	-1.15

零点漂移值均小于 2mV，满足标准要求。

### 3.3.2 电缆拉力测试

本次电缆拉力测试项目内容如下表所示：

序号	概要	项目
1	外观检查	检查传感器的完整性，没有缺陷。
2	额定拉力	进行额定拉力加载，检测形变。
3	电气检测	检测传感器的输入/输出电阻。
4	极限加载	对电缆进行极限抗拉测试。



经检查传感器的头部完整，外壳/电缆接口圆滑，无裂开。将传感器与电缆长 10cm 左右截断。将传感器头部安装于拉力测试机的上夹具，尾端折弯之后用下夹具夹紧，保持电缆松弛。逐渐加载拉力到压力表显示>10Kg（100N），如下图 9。然后松开加载。将传感器从拉力试验机上取下来，检测传感器输入/输出电阻如下：

S/N: E223557	测试之前	测试之后
红黑线输入电阻 ( $\Omega$ )	3218	3217
绿白线输出电阻 ( $\Omega$ )	3239	3236

将传感器重新安装于压力测试机上，继续加载到电缆拉力值最大值（显示值 12.2Kg=126N），此时电缆明显被拉长，电缆外皮被拉长，屏蔽线未被拉出转接头，上端夹线位置内部的线芯已被拉裂。



Figure 10. The cable tension value is 126N

图 10. 电缆拉力值为 126N

电缆拉力测试结果：在 10kg 拉力范围内传感器电缆不会产生断裂，传感器输出性能基本没变化。

### 3.3.3 可靠性测试结论

通过设计冲击耐受和电缆拉力试验，对设计的传感器进行可靠性验证，得到了以下结论：

- （1）过载测试采用冲击法，过载测试在冲击台面与传感器之间加装冲击放大器，冲击加速度约为 16000g，进行多次冲击后传感器没有损坏。
- （2）通过反复拉伸和弯曲试验、单向和双向扭转试验，本次测试样品传感器电缆的平均极限拉力为 150N，满足日常使用过程中的拉力要求；
- （3）使用基本测量法，对多次测量的数据进行计算处理，确定传感器输出飘移量大约为 0.3g。
- （4）参考国际标准组织 ISO 和行业标准进行温度、湿度、振动和电磁干扰测试，测试数据显示传感器每年数据衰退 1.5%，具有较长的使用寿命。
- （5）本次测试传感器样品经过可靠性试验后，零件完整，各项性能表现正常，安全可靠。

## 4 讨论

近年来，国内多个厂商自主研发的车身加速度传感器精确度高、成本低，有效地降低了汽车检测的试验成

本。由于假人用加速度传感器技术要求高，目前广泛应用的传感器仍依赖进口。根据碰撞测试的工况要求，自主研发一款负载小、频响宽的高性能加速度传感器能够有效地降低企业生产成本。本文第三章的基本性能测试结果可以看出，该款传感器性能高于《SAE J211-AUG2009》的标准要求，能够应用在碰撞测试中。

目前广泛应用于假人测试的 7264C-2K 传感器由美国 ENDEVOC 公司生产，其性能得到普遍认可。设计的传感器与 7364C-2K 传感器在假人头部跌落测试实验中，两款传感器的误差范围能够控制在 5% 以内，谐振频率都能够大于 28kHz。在频率测试响应中，本次设计的传感器在 $\pm 5^\circ$ 平坦度范围显示出了比 7264C-2K 更大范围的带宽，从零点温漂测试结果来看，该款传感器也具有较好的热稳定性。

## 5 结论

本次设计的一款假人用传感器在性能方面表现优秀，各环节自主可控，以下是本次测试结果总结：

(1) 本次用于测试的传感器是一款基于压阻效应，利用 MEMS 技术设计的低阻尼宽频响加速度计。经测试，该款传感器具有动态范围宽、线性范围广、热稳定性好等优点。

(2) 参考 SAE J2856 标准要求设计头部跌落测试，样品传感器与 ENDEVCO 的 7264C-2K 型号传感器进行多组假人头部跌落标定比对测试中，该款传感器表现出良好的一致性。

(3) 经测试，谐振频率大于 28kHz，带内平坦度在 $\pm 5\%$ 范围内带宽为 6kHz，封装后的传感器经过 16000g 的冲击没有失效，电缆抗拉 125N 没有断裂，老化测试数据大约为每年 1.5%。

总体来说，该款传感器设计达到了标准要求，实际测试效果良好，可以广泛应用于汽车碰撞测试中测量假人加速度。

## 参考文献

- [1] 刘志祥,张志强,张洪顺,等.轨道车辆碰撞试验加速度传感器选型试验研究[J].机车电传动,2020,(04):33-35.
- [2] Endevco Inc.7264C-2000 型压阻式加速度传感器[EB/OL].(2012-08-29)[2014-09-22].
- [3] 杨雨君.MEMS 高 g 值双轴压阻式加速度传感器研究[D].陕西理工大学,2023.
- [4] 王毓婷.压阻式三轴高 g 值加速度传感器设计[D].中北大学,2023.
- [5] 张洁宇,石云波,赵锐,等.压阻式加速度传感器动力学响应分析与验证[J].机械设计与制造工程,2024,53(02):114-118.
- [6] SAE International. SAE J2570-2009 Performance Specifications for Anthropomorphic Test Device Transducers [S]. 2009.
- [7] SAE J 2856. User's Manual for the 50th Percentile Male Hybrid III Test Dummy [S]. 2009.
- [8] Endevco 新品发布——用于冲击环境的 2262B 型有阻尼压阻式加速度传感器[J].设备管理与维修,2021,(22):5.
- [9] 肖咸盛,杨拥军,卞玉民,张旭辉.一种汽车碰撞试验用低阻尼宽频响加速度传感器 [J]. 微纳电子技术, 2017, 54 (05): 329-335+341.