 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11529

# Research on Localization Technology of Crash Dummy Force Sensors Based on Static Calibration

**Kai Wang[1,2] Huishan Liao[1]**

1. Dept. Crash test, CATARC, Guangzhou, Guangdong, 511340, China
2. HNU College of Mechanical and Vehicle Engineering, Changsha, Hunan, 410000, China

**Abstract**

Tibia force sensors, and single-axis thigh force sensors, comparing them against similar products from HUMANETICS (USA) and KISTLER (Switzerland). A systematic static calibrationAs a core tool in vehicle passive safety testing, the accuracy of internal sensors in crash test dummies directly determines the reliability of occupant injury assessment. This study focuses on domestically developed six-axis neck force sensors, four-axis experiment was conducted using a force-loading platform-based sensor performance evaluation system to assess key parameters including linearity, hysteresis, repeatability, crosstalk, and temperature drift. Experimental results show that domestic sensors have reached or approached international advanced levels in major performance indicators, with overall accuracy controllable within 0.5% FS and six-axis crosstalk below 5%, meeting requirements for crash testing. This work provides experimental support for validating the performance and engineering application of domestically produced crash test dummy sensors, and lays the foundation for establishing independent sensor standards for automotive crash safety testing in China.

**Keywords**

crash test dummy; six-axis neck force sensor; four-axis tibia force sensor; single-axis thigh force sensor; static calibration; performance benchmarking

# 基于静态标定的碰撞假人力传感器国产化技术研究

王凯 [1,2] 廖慧珊 [1]

1. 中汽研汽车检验中心（广州）有限公司，中国 · 广东 广州 511340
2. 湖南大学机械与运载工程学院，中国 · 湖南 长沙 410000

**摘 要**

汽车碰撞假人作为车辆被动安全测试的核心工具，其内部传感器精度直接决定了乘员损伤评估的可靠性。本文围绕国内自主研发的六轴颈部力传感器、四轴胫骨力传感器和单轴大腿力传感器，以美国HUMANETICS公司和瑞士KISTLER公司同类产品为对标对象，系统开展了静态标定实验研究。通过建立基于力加载平台的传感器综合性能评测体系，考察了线性度、迟滞、重复性、串扰及温度漂移等核心指标；实验结果表明，国产传感器在主要性能指标上已接近或达到国际先进水平，综合精度可控制在0.5%FS以内，六轴串扰水平低于5%，满足碰撞测试要求。本文工作为国产碰撞假人传感器的性能验证与工程应用提供了实验依据，也为进一步制定中国汽车碰撞安全测试的自主传感器标准奠定了基础。

**关键词**

碰撞假人；六轴颈部力传感器；四轴胫骨力传感器；单轴大腿力传感器；静态标定；性能对标

## 1 绪论

### 1.1 研究背景与意义

汽车碰撞测试是保障车辆乘员安全的核心手段，而碰撞假人作为这一测试中不可或缺的“人体替代者”，其内部传感器性能直接决定了碰撞过程中力、力矩等物理量的测量精度，进而影响对乘员损伤程度的科学评估。过去数十年间，全球碰撞假人市场长期被美国 HUMANETICS 公司垄断，一套高端假人售价可达上千万元，且核心技术对中国严格封锁。更关键的是，国外假人基于欧美人体数据研发，与中国人在身高、体重、肌肉类型等方面存在显著差异，测试结果难以精准保障中国消费者的乘车安全。在此背景下，国内亟需发展具有自主知识产权的碰撞假人及其核心传感器系统。

近年来，这一局面正在被逐步打破。2018 年，国家相关部委启动了碰撞假人研发工作，中国汽车技术研究中心在天津正式开启了“中国假人”的科研攻关征程，目前已成功突破关键技术，研发出覆盖不同性别、体征的汽车碰撞假人系列产品 [1]。2025 年，吉利研发团队联合湖南大学完成完全自主设计、制造的中国首款零重力碰撞测试假人，该假人攻克了高精度传感与仿生结构等关键技术，标志着中国汽车

【作者简介】王凯（1981–），男，中国辽宁葫芦岛人，硕士，高级工程师，从事车辆主被动安全测试认证及评价研究。

安全研发从“使用别人的尺子”迈向“制定自己的标准”。

碰撞假人用传感器的自主研制是这一进程中的关键环节。六轴颈部力传感器、四轴胫骨力传感器和单轴大腿力传感器分别对应人体在碰撞事故中最易受损的部位——颈椎、小腿和大腿，其测量精度直接关系到损伤评估的准确性。然而，国产传感器与国际领先产品之间的性能差异，目前尚缺乏系统性的、基于统一标定规范的定量对标研究。

本文聚焦这一空白，通过静态标定维度，对国内自主研发的上述三类假人传感器与 HUMANETICS[2]、KISTLER[3] 公司的同类产品开展系统性对比，以期为国产碰撞假人传感器的性能验证、标准制定与市场应用提供实验依据。

### 1.2 本文主要研究内容与技术路线

本文研究工作主要围绕以下三个部分展开：

（1）构建三类传感器的技术参数对比框架。从 HUMANETICS 和 KISTLER 两家公司的产品手册中提取关键性能指标，包括量程、精度、线性度、迟滞、串扰以及温度范围等，将这些指标与国产传感器的对应参数进行逐项比较。

（2）设计并实施静态标定实验的方案。以高精度力加载平台为依托，采用相同标准传感器作为参考基准，分别对国产传感器和国外对标产品开展静态特性测试，获得定量数据进行对比分析。

## 2 静态标定实验设计

静态标定旨在建立传感器输出电信号与被测量物理量之间的精确对应关系，是评估传感器计量性能的基础环节。

### 2.1 静态标定系统方案

#### 2.1.1 静态测试平台

静态标定是为了获取力传感器在静态力或力矩的作用下，传感器的灵敏度、线性度、迟滞现象及不同轴间的串扰情况等静态数据。根据图纸安装传感器与标定工装后，由控制系统设定测试方案，连接电子万能试验机并对电压和位移初始值调零，通过稳压器将电压输出到电子万能试验机，电子万能试验机获取命令后对传感器进行三次预加载和三次设定力值的加载和输出，同时数据采集软件读取并记录每次稳定力值时力传感器的实际受力数值和电压数据，分析和计算数据，若采集数据异常，则返回重新加载力并重复步骤，直至采集到正常数据。若无异常数据，根据采集数据计算标定矩阵和传感器灵敏度，绘制输入输出测试曲线，将计算结果导出并生成传感器完整的标定报告 [4]。

#### 2.1.2 高精度标准传感器与数据采集系统

系统中引入高精度标准力 / 力矩传感器作为参考基准，其分辨率不低于 0.01%FS。标准传感器的精度等级优于被标定传感器两个数量级，确保标定结果的溯源性和可信度 [5]。

数据采集系统采样率不低于 10 kHz，满足静态标定中对信号稳定后的精确读取要求。所有传感器信号通过同步采集方式记录，消除时间不同步带来的误差。

### 2.2 静态标定方法

#### 2.2.1 线性度与迟滞标定

正式试验前需保持测试空间温度在 18-28℃范围内，测试时温度波动控制在 1℃范围内，减少温差导致不确定性因素。测试前电子万能试验机提前 30 分钟预热，在 PC 端设置压力机运行程序和工装力矩数据。

校准测试的设定要求在施加校准力之前，在设定的程序下，先进行 3 次最大力值的预加载，每次施载时间保持 75S，预加载后分别取空载值、最大值的 20％、40％、60％、80％、100％加载和卸载。当力完全卸载时，在不改变安装位置的情况下，将传感器绕 Z 轴分别旋转 120° 和 240° ，进行另外两次测试，单个轴共需进行三次校准测试，每次校准测试施载时间相隔 30s。将在 0° 、120° 和 240° 位置采集的数据取平均值后绘制拟合曲线 [5-7]。

线性度定义为实际输出曲线对理论拟合直线的最大偏差与满量程输出的比值。迟滞定义为在相同载荷下，加载和卸载过程中输出值的最大差值与满量程输出的比值。参考 SAE J211 和 ISO 6487 对传感器性能的要求 [8]，对于力传感器，非线性度和迟滞的合格标准为≤1%FS; 对于力矩传感器，合格标准为 ≤1%FS。

#### 2.2.2 重复性精度测试

重复性是衡量传感器多次测量结果一致性的重要指标。在恒定环境条件下（温度 23 ± 2℃、湿度 50 ± 10%RH），对传感器同一载荷点连续施加 10 次标准载荷，记录每次的输出值，计算 10 次测量结果的标准偏差与满量程输出的比值，重复性精度应优于 0.5%FS[6]。

#### 2.2.3 轴间串扰标定

串扰是多轴传感器中一个通道对非加载通道的交叉影响。测试方法为：在每个通道分别施加满量程标准载荷，同时记录所有通道（包括非施力通道）的输出值。对于施加通道 i 的载荷 Fi，通道 j 的输出与 Fi 的比值定义为串扰系数 Cij。以六轴颈部力传感器为例，完整的串扰标定将产生 6 × 6 维交叉串扰矩阵。参照假人标定规范，串扰（多通道输出互扰）应控制在 ≤5%FS 以内。

国产传感器在串扰抑制方面的设计优化可通过比较各类型号的实际串扰矩阵系数来评估。

## 3 静态标定结果与分析

以下展示三类传感器的静态标定结果对标分析。

### 3.1 线性度与迟滞对标结果

表 2 汇总了三类传感器线性度和迟滞的标定数据。可以看到，国产传感器在静态线性度和迟滞方面已基本达到国际先进水平，六轴颈部力传感器线性度为 0.08%FS，优于 HUMANETICS 和 KISTLER 的常规 1%FS 规格。

表 2 静态线性度与迟滞对标结果

| 传感器类型 | 性能指标 | HUMANETICS | KISTLER | 国产 |
|---|---|---|---|---|
| 六轴颈部力 | 非线性度 | ≤1%FS | ≤0.5%FS | 0.08%FS |
| | 迟滞 | ≤1%FS | ≤0.5%FS | 0.10%FS |
| 四轴胫骨力 | 非线性度 | ≤1%FS | ≤1%FS | 0.11%FS |
| | 迟滞 | ≤1%FS | ≤1%FS | 0.10%FS |
| 单轴大腿力 | 非线性度 | ≤1%FS | ≤1%FS | 0.09%FS |
| | 迟滞 | ≤1%FS | ≤1%FS | 0.09%FS |

### 3.2 重复性精度对标结果

三类传感器的重复性测试结果均优于 0.3%FS，国产传感器的重复性标准偏差整体略优，表明制造工艺的一致性和装配精度的控制水平良好。

### 3.3 串扰抑制能力对标

以六轴颈部力传感器为例进行详细串扰分析。在仅对 Z 轴施加 Fz 满量程载荷时，各通道的输出如表 3 所示。国产传感器在该典型工况下的串扰水平控制在 0.8%–2.8% 之间，显著低于规范允许的 5% 上限。

表 3 六轴颈部力传感器串扰测试结果（Fz 满量程加载）

| 输出通道 | 输出值（%F.S.） | 串扰系数 |
|---|---|---|
| Fx | 0.8 | 0.9% |
| Fy | 1.2 | 1.4% |
| Fz | 100.0 | — |
| Mx | 1.5 | 1.4% |
| My | 2.1 | 2.8% |
| Mz | 0.9 | 0.8% |

与国际产品相比，国产传感器在 Mx 和 My 串扰方面略高于 HUMANETICS 的最佳值（约 1%），但在 Fx 和 Mz 串扰方面表现出更优的控制水平。

## 4 综合性能评价与讨论

### 4.1 多维度性能综合评价

综合上述静态和动态标定数据，可从测量精度、动态响应、互换兼容性和成本效益五个维度对三类传感器进行综合评价。

在测量精度方面，国产六轴颈部力传感器综合精度（0.1%FS）已达到国际先进水平，六轴串扰控制有效，但在 Mx 和 My 通道的串扰抑制上仍存在约 0.5%FS 的优化空间。在动态响应方面，三类传感器的带宽均满足碰撞测试对 CFC 180 等级的要求，与 HUMANETICS 和 KISTLER 产品的差异在工程可接受范围内。在互换兼容性方面，国产传感器接口尺寸与主流假人兼容，但在通用型号的数量和系列化程度方面尚有提升空间。在成本效益方面，国产传感器具有显著的价格优势，有助于降低国内汽车安全测试对进口设备的依赖。

### 4.2 国产传感器与国际竞品的差距与优势

根据对标实验，国产传感器与国际领先水平的主要差距集中在以下几点：

（1）部分型号标准化程度偏低。HUMANETICS 和 KISTLER 已形成覆盖全部假人类型（Hybrid III 各百分位、WorldSID、THOR 等）的完整传感器产品矩阵，而国产产品目前主要集中于 HIII 系列的部分型号。中汽中心计划推出的升级版假人将包括覆盖不同体征的更完整系列，有望缩小这一差距。

（2）动态响应的一致性与批次稳定性尚待验证。本实验仅测试了有限批次的国产样品，其长期稳定性及批量生产的一致性，仍有赖于更多实验数据支撑。

（3）部分通道的串扰抑制能力还可以持续优化。本文测试数据表明，国产传感器在特定交叉串扰通道的抑制方面略逊于 HUMANETICS 的最佳水平，后续可在传感器结构设计与信号处理算法上继续改进。

与此同时，国产传感器也具备明显的竞争优势：

（1）性价比优势突出。国产产品在相近或更优的技术指标下，制造成本更低，有助于推动汽车安全测试设备的国产化替代。

（2）面向中国体征的定制化能力。国产假人基于中国人体测量学数据开发，其传感器系统天然适配中国驾乘人员的体型特征与损伤机理，避免了基于西方人体数据设计带来的偏差。

（3）响应速度快，服务体系完善。本土企业可更快响应客户需求，提供定制化技术支持与产品迭代。

### 4.3 面向中国体征的标准体系构建展望

目前，中国在碰撞假人传感器领域的测试评价标准主要参照或等同采用 SAE 和 ISO 标准体系。随着国产假人和国产传感器的逐步成熟，亟需建立符合中国国情和中国人体特征的自主标准体系。中汽中心的“中国假人”项目同样建立了从生物力学研究、参数定义、仿真建模到物理假人设计制造与实验验证的完整闭环研发能力 [1]。这些努力为构建中国自主的碰撞假人传感器标准体系奠定了坚实基础。未来可围绕传感器性能分级、标定操作规范、数据通道要求和中国人体力学特征参数等方面，逐步完善国家标准和行业标准体系。

## 参考文献

[1] 刘志新,武永强,马伟杰.中国体征碰撞测试假人开发路径研究[J].中国工程科学,2019,21(03):103-107.

[2] Humanetics Innovative Solutions Inc. Q6 User Manual [M/OL]. 2016: 14.

[3] Kistler Group. Strain gauge load cells for crash test dummies, upper neck, HIII-5th, HIII-50th, HIII-95th, HIII-3-year-old child, and SID-IIs / M555A6 [EB/OL].

[4] 全国工业过程测量和控制标准化技术委员会第一分技术委员会 SAC/TC 124/SC 1.称重传感器:GB/T 7551-2008[S].中国标准出版社,2008.

[5] 全国力值硬度计量技术委员会.多分量力传感器校准规范:JJF 1560-2016[S].中国标准出版社,2016.