



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

动车组转向架振动温度复合传感器 校准规范

Calibration Specification for EMU Bogie Vibration-Temperature
Composite Sensor
(征求意见稿)

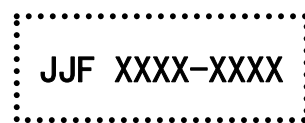
202×-×-×发布

202×-×-×实施

国家市场监督管理总局 发布

动车组转向架振动温度复合 传感器校准规范

Calibration Specification for EMU
Bogie Vibration-Temperature Composite
Sensor



归口单位：全国铁路专用计量器具计量技术委员会

铁路专用力学电学分技术委员会

主要起草单位：中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所

中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所

北京唐智科技发展有限公司

参加起草单位：北京局集团公司北京动车段

厦门乃尔有限公司

本规程委托全国铁路专用计量器具计量技术委员会

铁路专用力学电学分技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

张宁宁（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

付久容（中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所）

李恒戌（北京唐智科技发展有限公司）

参加起草人：

赵晓明（北京局集团公司北京动车段）

孙浩琳（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

侯 浩（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

吕智华（厦门乃尔有限公司）

目录

引言 V

1 范围..... 1

2 引用文件..... 1

3 概述..... 1

4 计量特性..... 1

5 校准条件..... 2

6 校准项目和校准方法..... 3

7 校准结果表达..... 6

8 复校时间间隔..... 6

附录 A 动车组转向架振动温度复合传感器的不确定度评估..... 7

附录 B 动车组转向架振动温度复合传感器校准记录参考格式..... 10

附录 C 动车组转向架振动温度复合传感器校准证书内页参考格式..... 12

引言

本规范依据 JJF1071《国家计量校准规范编写规则》规定的规则编写。

JJF1156《振动冲击转速计量术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范；JJG233《压电加速度计》、CB1320《鱼雷振动模态测试方法》、JJF1943《冲击测量仪校准规范》等共同构成支撑本规范制定工作的技术性系列规范。

本规范为首次发布。

动车组转向架振动温度复合传感器校准规范

1 范围

本规范适用于动车组转向架振动温度复合传感器（以下简称复合传感器）的校准，其他用于动车组的复合传感器也可参照本规范。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1156	振动冲击转速计量术语及定义
JJF 1059.1	测量不确定度评定与表示
JJG233	压电加速度计
CB 1320	鱼雷振动模态测试方法
JJF1943	冲击测量仪校准规范
JJF1270	温度、湿度、振动综合环境试验系统校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 概述

动车组转向架振动温度复合传感器应用于动车组转向架的轴箱、齿轮箱、电机等部位，主要用于监测动车组转向架的振动、冲击和温度等信息，通过数据分析，实时评价被监测对象的工作状态，在发生轴承、轮对等异常导致的超温或加速度超限时，进行导向安全的预警提示。

动车组转向架振动温度复合传感器的结构和重量是依据动车、地铁、高铁、磁悬车浮列的设计需求量身定制。该类复合传感器属于压电式振动传感器，传感器振动芯体部分是采用压电陶瓷元件作为核心敏感器件，利用压电陶瓷敏感元件的正压电效应将加速度物理量转变为电信号。传感器温度元件部分是采用铂电阻对温度信号进行采集，实现对温度信号的检测。

4 计量特性

4.1 零点电压

复合传感器在规定工作范围内，零点电压应满足：8 V～14 V。

4.2 灵敏度幅频

复合传感器在规定工作范围内，灵敏度幅频应不超出 15%。

4.3 灵敏度幅值线性度

复合传感器在规定工作范围内，幅值线性度应不超出 10%。

4.4 横向振动灵敏度比

复合传感器在规定工作范围内，横向振动灵敏度比应不超出 5%。

4.5 灵敏度温度响应

某一频率下的温度响应曲线，复合传感器的温度响应偏差不超过 15%。

注：以上计量特性要求不用于合格性判别，仅供参考，也可参照国家标准、国际标准或厂家出厂相应条款给出的技术指标要求。

4.6 安装谐振频率

参照厂家出厂相应条款给出的技术指标要求。

5 校准条件

5.1 环境条件

环境温度：(18~28)℃；

相对湿度：≤75%；

实验室及周围环境应无振动源和冲击源，无强电场、强磁场、强声场的干扰。用于校准的设备应接地良好。

5.2 测量标准及其他设备

5.2.1 振动激励系统（振动台、功率放大器和函数发生器）

动激励系统的要求见表 1。

表 1 振动激励系统

项目名称	技术指标
频率的最大允许误差	±0.1%
频率稳定度（频率周期内读数的）	±0.1%
加速度幅值稳定性（频率周期内读数的）	±0.1%
总谐波失真度	≤5% ($f > 20$ Hz) ≤10% (全频率范围内)
横向振动比	≤10% ($f \leq 1$ k Hz) ≤30% ($f > 1$ k Hz)
信噪比	≥50 dB ($f \geq 10$ Hz) ≥20 dB ($f < 10$ Hz)

5.2.2 参考加速度计套组（参考加速度计和适调放大器）

在选定的参考加速度和频率下，采用绝对法进行检定，其参考条件下灵敏度幅值的相对扩展不确定度应不大于 0.5% ($k=2$)。其它条件下灵敏度幅值的相对扩展不确定度应不大于 1.0% ($k=2$)。适调放大器具备电荷放大器和 IEPE 供电功能，技术指标不低于二级 B 类要求。

5.2.3 函数发生器

函数发生器的频率范围为 0.1Hz~100kHz，频率误差应优于±0.25%，幅值稳定性应优于±0.02dB。

5.2.4 数字电压表

数字电压表的要求见表 2。

表 2 数字电压表

项目名称	技术指标
频率范围	20 Hz~10 kHz
最大允许误差	$\pm 0.2\%$

5.2.5 动态信号分析仪

动态信号分析仪符合 A 类要求，且分析频率不低于 200kHz。

5.2.6 冲击标准装置

主要用于复合传感器幅值线性度的检定。可根据被检复合传感器的冲击加速度范围，采用产生合适脉冲持续时间和峰值脉冲的冲击绝对法或比较法检定装置。冲击脉冲应是一个近似正弦、半正弦正矢或高斯的加速度波形。

5.2.7 安装平台

安装平台的谐振频率低于被校复合传感器一阶谐振频率的 20%，质量不低于目标传感器的 10 倍。

5.2.8 力锤

测力范围 0-1000N。

5.2.9 温度箱

温度范围需涵盖 -70°C ~ 150°C ，此范围内的温度偏差 $\pm(2\sim 3)^{\circ}\text{C}$ ，温度波动度 $\pm(1\sim 2)^{\circ}\text{C}$ ，温度指示仪表示值误差 $\pm(2\sim 3)^{\circ}\text{C}$ 。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目及校准技术要求见第 4 款。校准项目应根据复合传感器型号及客户要求确定。

6.2 校准方法

6.2.1 外观检查

应标明复合传感器的型号规格、编号、制造厂商等基本信息。复合传感器壳体应无明显的机械损伤，安装表面应无毛刺及其它瑕疵，安装基面应平整光滑。

6.2.2 零点电压

将复合传感器探针按校准方向 0° 静止放置在测试平台上，直接测得振动信号正、负两端的零点电压。

6.2.3 灵敏度幅频

用制造商推荐的扭矩值，将被校复合传感器与参考加速度计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。

参考频率和参考加速度条件下确定被校复合传感器的灵敏度。被校复合传感器的输出与所承受的加速度值之比即为参考灵敏度幅值。被校复合传感器灵敏度幅值 S_2 按公式(1)计算：

$$S_2 = \frac{X_2}{X_1} \times S_1 \quad (1)$$

式中：

S_1 ——参考加速度计灵敏度幅值，mV/(m·s⁻²) 或pC/(m·s⁻²)；

X_1 ——参考加速度计输出值，mV或pC；

X_2 ——被测加速度计输出值，mV或pC。

6.2.4 灵敏度幅值线性度

采用振动或冲击方法，在实际使用的加速度幅值范围内选取 3-10 个点（包括最大和最小加速度），进行灵敏度幅值线性度的校准。

对加速度幅值范围不大的情况，用振动法校准。灵敏度的幅值线性度用测量点的灵敏度幅值相对于参考灵敏度幅值的相对偏差表示。

对加速度幅值范围较大的情况，用冲击法校准，并用最小二乘法计算灵敏度幅值线性度。采用规定的扭矩值将被校复合传感器刚性固定在冲击标准装置上。在被校复合传感器量程范围内选择建议不少于 7 个点（含最小和最大加速度峰值）进行测量，得到一组标准冲击加速度峰值 a_i 条件下的冲击加速度灵敏度 S_i ， $i=1, 2, \dots, n$ ， n 为冲击校准点数。由 n 次校准的加速度 a_i 和灵敏度 S_i ，求出回归直线：

$$S = S_0 + K \times a \quad (2)$$

$$\text{式中：斜率：} K = \frac{\sum_{i=1}^n a_i S_i - \bar{a} \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 - \bar{a} \sum_{i=1}^n a_i} \quad (3)$$

$$\text{截距：} S_0 = \bar{S} - K \times \bar{a} \quad (4)$$

$$\text{加速度平均值：} \bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

$$\text{灵敏度平均值：} \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}$$

加速度幅值线性度：

$$\gamma = \frac{K a_{\max}}{S_0} \times 100\% \Big|_{a_{\max}} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{K \times 10000}{S_0} \times 100\% \Big|_{10000 \text{ m/s}^2} \quad (6)$$

公式 (5)表示测量仪在最大加速度峰值处的幅值线性度；

公式 (6)表示复合传感器每 10000m/s^2 时幅值线性度的百分数。校准结果中应注明幅值线性度计算采用的方法。

式中：

γ ——幅值线性度，%；

a_i ——第 i 次测量时中心位置冲击加速度峰值， m/s^2 ；

s_0 ——拟合直线截距， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 。

6.2.5 横向振动灵敏度比

将被校复合传感器刚性安装在横向校准装置台面中心，校准装置在校准频率点的横向振动比应 $\leq 1\%$ 。在某个参考幅值和频率下激励并测出复合传感器灵敏轴方向的灵敏度，在相同的幅值和频率下沿垂直于灵敏轴方向起振，并使被校复合传感器绕其自身灵敏度轴转动，使其横向振动方向绕被校复合传感器的灵敏度轴转动（在 360° 范围内以 45° 或小于 45° 为增量逐次旋转），找出横向振动灵敏度最大值的方向。

横向振动灵敏度比计算公式：

$$TSR = \frac{S_{T\max}}{S_z} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

TSR ——横向振动灵敏度比，%；

$S_{T\max}$ ——被校复合传感器的最大横向灵敏度值， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ；

S_z ——被校复合传感器的轴向灵敏度值， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 或 $\text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 。

6.2.6 安装谐振频率

按规定的安装力矩将被校复合传感器固定在安装平台上。用力锤/激振器施加激励，通过传递函数的方法获得复合传感器的安装谐振频率。基于复合传感器的工作方式，采用扫频激励和脉冲激励方式。测量方式采用激光多普勒非接触测量法，减少附加质量的影响。

6.2.7 灵敏度温度响应

采用比较法进行温度响应校准。通过隔热的试验夹具，将被检传感器与参考传感器同轴刚性地安装到振动台上。被检加速度计放在温度箱内，参考加速度计放在温度箱外。测试时，调节恒温箱内的温度到选定温度值，为使被检传感器温度达到稳定，对于质量小于 100g 的传感器，各温度测点至少恒温 15min ，质量大于 100g 小于 500g 的复合传感器，至少恒温 30min 。为了抑制温度变化的影响，应对参考加速度计进行保护，以使其在整个校准过程中，由周围温度影响造成的灵敏度变化保持在 2% 以内。

振动激励系统仅适用于横向振动小于轴向振动 25% 的已知频率点上的检定。在振动激励系统的选择和夹具的设计中,应考虑在校准的频率点上使被检加速度计与参考加速度计之间的相对运动小到可以忽略不计。

另一种方法是将参考加速度计与被检加速度计一同安装在温度箱内的夹具上。这种方法仅限于已知参考加速度计温度响应的温度范围。

某一频率下的温度响应曲线,温度响应偏差用测试温度下的灵敏度与室温(23℃)下的灵敏度之差相对于室温灵敏度的百分数给出。

对某一温度下的频响曲线,灵敏度频响偏差用频率 160Hz 时的灵敏度与其他频率下灵敏度的偏差相对于它的百分数给出。

7 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映,校准证书应至少包括以下信息:

- a) 标题,“校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点(如果与实验室的地址不同);
- d) 证书的唯一性标识(如编号),每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 进行校准的日期,如果与校准结果的有效性和应用有关时,应说明被校对象的接受日期;
- g) 校准所依据的技术规范的标识,包括名称及代号;
- h) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- i) 校准环境的描述;
- j) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- k) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识,以及签发日期;
- l) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- m) 未经实验室书面批准,不得部分复制证书的声明。

推荐的校准证书的内容格式见附录 C。

8 复校时间间隔

复合传感器的复校时间间隔建议为 2 年。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定,因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

动车组转向架振动温度复合传感器的不确定度评估

A.1 测量模型

在压电加速度计的校准过程中，有很多因素（加速度计安装因素、加速度波形失真、振动台横向振动以及环境条件和温湿度等）会对灵敏度校准引入不确定度，振动的被测量可认为由 11 个量 $X_1, X_2, \dots, X_{11}$ 构成，即

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_{11})$$

基于泰勒级数的一阶近似函数，被测量 Y 的估计值 y 为由各输入量 x_i 按数学模型确定的函数关系 f 计算得到：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_{11})$$

根据不确定度传播率通用公式，确定合成标准不确定度 u_c ，并将其作为 Y 的测量标准不确定度，

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{11} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=i+1}^{11} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}$$

式中， $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为灵敏度系数，由 c_i 表示。

由于各输入量之间相互独立， c_i 的绝对值为 1，由函数误差理论可得：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{11} u_i^2(x_i)$$

A.2 (10~2000)Hz 条件下加速度幅值和相位的测量不确定度

1) 动态信号分析仪的幅值测量误差引入的标准不确定度分量 $u_{1,rel}(S)$

动态信号分析仪的幅值测量误差优于 0.5%，其标准不确定度分量为：

$$u_{1,rel}(S) = \frac{0.5\%}{2} = 0.25\%$$

2) 参考加速度套组引入的标准不确定度分量 $u_{2,rel}(S)$

参考加速度计套组的年稳定性优于 0.5%，引入的幅值误差优于 0.2%，按照均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{2,rel}(S) = 0.24\%$$

3) 振动台横向对测量的影响引入的标准不确定度分量 $u_{3,rel}(S)$

参照标准振动台证书，假设在参考条件 160Hz 和 100m/s^2 下，标准振动台的横向振动

比为 1.5%，其带给电压测量的幅值误差为 0.16%，按均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{3,rel}(S) = \frac{0.16\%}{\sqrt{3}} = 0.092\%$$

4) 参考放大器增益挡偏差的影响引入的标准不确定度分量 $u_{4,rel}(S)$

按照均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{4,rel}(S) = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.058\%$$

5) 传感器频率响应偏差引入的标准不确定度分量 $u_{5,rel}(S)$

在通频带（10~2000）Hz 内，对振动传感器进行频率响应测试，测得其加速度幅值最大误差为 0.5%，按照均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{5,rel}(S) = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.289\%$$

6) 环境扰动的影响引入的标准不确定度分量 $u_{6,rel}(S)$

温度、微小振动及噪声对测量结果扰动的影响，假设其加速度幅值和相位误差小于 $\pm 0.05\%$ ，按正态分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{6,rel}(S) = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\%$$

7) 温度探针摇摆的影响引入的标准不确定度分量 $u_{7,rel}(S)$

假设被校复合传感器温度探针部分与复合传感器本体之间相对运动产生的加速度幅值误差为 $\pm 0.2\%$ ，按均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{7,rel}(S) = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} = 0.15\%$$

8) 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{8,rel}(S)$

在参考条件下，参考灵敏度进行重复 10 次测量，假设验标准偏差：

$$u_{8,rel}(S) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.03\%$$

确定参考条件下加速度幅值和相位标准不确定度分量见表 2。

表 3 参考条件下标准不确定度分量

序号	不确定度来源	标准不确定度分量 $u_{i,rel}$	加速度幅值 (%)
1	动态信号分析仪的幅值测量误差	$u_{1,rel}$	0.25
2	参考加速度计套组对测量的影响	$u_{2,rel}$	0.24
3	干扰电压对测量的影响	$u_{3,rel}$	0.092
4	振动台横向加速度对测量的影响	$u_{4,rel}$	0.058
5	传感器频率响应偏差对测量的影响	$u_{5,rel}$	0.289
6	环境扰动的影响	$u_{6,rel}$	0.029
7	温度探针摇摆的影响	$u_{7,rel}$	0.015
8	测量重复性	$u_{8,rel}$	0.03

合成标准不确定度计算公式：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} = 0.5\%$$

A.3 （10~2000）Hz 条件下校准结果的扩展不确定度

取 k=2，则校准结果的扩展不确定度为

$$U_{rel} = 1.0\%$$

附录 B

动车组转向架振动温度复合传感器校准记录参考格式

原始记录（编号：_____）

客户单位					
地 址					
被校器具名称					
型号/规格		器具/管理 编 号			
制造单位					
温度	℃	湿度	%RH	其它	
校准日期	年	月	日	校准地点	
所用的计量标准器具					
名称	编号	测量范围	准确度等级/最大允许误差/测量不确定度等	溯源机构/证书编号	有效日期
依据的技术文件及编号					
校准人员			核验人员		

一、外观检查：复合传感器（有 无）明显机械损伤，安装表面（有 无）毛刺及其他瑕疵。

二、零点电压：

位置/方向	零点电压（V）

三、频率响应

位置/方向	频率/Hz	标准输出电压/mV	被校输出电压/mV	灵敏度/(mV/(m·s ⁻²))	幅值偏差/%

四、幅值线性度

位置/方向	频率/Hz	标准输出电压/mV	被校输出电压/mV	灵敏度/(mV/(m·s ⁻²))	偏差/%

五、横向振动灵敏度比

位置/方向	旋转角度/°	标准输出电压/mV	被校输出电压/mV	横向灵敏度/(mV/(m·s ⁻²))	轴向灵敏度/(mV/(m·s ⁻²))	横向振动灵敏度比/%

六、灵敏度温度响应

位置	温度/°C	标准输出电压/mV	被校输出电压/mV	灵敏度/(mV/(m·s ⁻²))

七、安装谐振频率：_____

八、不确定度：_____

附录 C

动车组转向架振动温度复合传感器校准证书内页参考格式

一、外观检查：_____。

二、零点电压：

位置/方向	零点电压 (V)

三、频率响应

位置/方向	频率/Hz	灵敏度/(mV/(m·s ⁻²))	幅值偏差/%

四、幅值线性度

位置/方向	频率/Hz	灵敏度/(mV/(m·s ⁻²))	偏差/%

五、横向振动灵敏度比：

位置/方向	横向灵敏度比/%

六、灵敏度温度响应

位置	温度/°C	加速度/(m/s ²)	灵敏度/(mV/(m·s ⁻²))

七、安装谐振频率：_____

八、不确定度：_____

《动车组转向架振动温度复合传感器校准规范》编制说明

(征求意见稿)

1. 工作简况

1.1 任务来源

根据《2025 年国家计量技术规范制定、修订》项目编号 MTC25/SC2-2025-01 计划要求，由全国铁路专用计量器具计量技术委员会铁路专用力学电学分技术委员会归口，北京长城计量测试技术研究所、中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所、北京唐智科技发展有限公司等单位共同起草的《动车组转向架振动温度复合传感器校准规范》，现已完成征求意见稿。

本规范是首次制定。

1.2 制修订本规范的必要性

动车组运营线路复杂、环境多变，在运行过程中，通过布置在车辆转向架上的振动温度复合传感器实时获取轴箱、齿轮箱、电机等监测对象的温度和振动、冲击加速度信息，通过数据分析实时评价被监测对象的工作状态，在发生轴承、轮对等异常导致的超温或加速度超限时，进行导向安全的预报警提示。为适应铁路发展需求，确保动车组转向架振动温度复合传感器计量性能符合量值溯源要求，参考相关技术文件，制定相应的计量校准规范，以满足该类传感器的量值溯源。

1.3 主要起草过程

项目计划下达后，在归口单位指导下，北京长城计量测试技术研究所、中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所、北京唐智科技发展有限公司等单位成立了规范起草组，对动车组转向架振动温度复合传感器的相关文件、标准、资料等情况进行了研究，最终确定本规范修订意见征求意见稿。起草组于 2026 年 7 月形成了本规范的征求意见稿。

2. 编制原则

2.1 规范格式统一、规范，符合 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、要求。

2.2 规范内容符合统一性、协调性、适用性、一致性、规范性要求。

- 2.3 规范技术内容安全可靠、成熟稳定、经济适用、科学先进、节能环保。
- 2.4 规范实施后有利于保障动车组转向架安全运行，符合铁路行业发展需求。

3. 主要内容

3.1 本规范以 JJG233 《压电加速度计》、JJF1059.1 《测量不确定度评定与表示》的有关技术要求以及相关的计量准则为主要的起草依据。

3.2 本规范规定了动车组转向架振动温度复合传感器的计量性能要求、通用技术要求、计量器具控制、校准方法等内容，适用于动车组转向架振动温度复合传感器的校准。

3.3 本规范的主要计量性能要求包括灵敏度幅频、灵敏度幅值线性度、灵敏度温度响应等。

3.4 本规范主要技术指标：

1) 零点电压

复合传感器的零点电压范围在 8V~14V。

2) 灵敏度幅频

在 10Hz~5000Hz 范围内，灵敏度偏差在 $\pm 15\%$ 。

3) 灵敏度幅值线性度

复合传感器在规定工作范围内，幅值线性度不超出 10%。

4) 横向振动灵敏度比

复合传感器在规定工作范围内，横向振动灵敏度比应不超出 5%。

5) 灵敏度温度响应

某一频率下的温度响应曲线，复合传感器的温度响应偏差不超过 15%。

6) 安装谐振频率

参照厂家出厂相应条款给出的技术指标要求。

4. 采标准情况

本规范未采用相关的国际标准。

5. 有无重大分歧意见

在起草过程中，起草组无重大分歧意见。

6. 其他应予说明的事项

无。

《动车组转向架振动温度复合传感器校准规范》起草组

2026 年 8 月

动车组转向架振动温度复合传感器校准结果不确定度评定

1、测量模型

在压电加速度计的校准过程中，有很多因素（加速度计安装因素、加速度波形失真、振动台横向振动以及环境条件和温湿度等）会对灵敏度校准引入不确定度，振动的被测量可认为由 11 个量 $X_1, X_2, \dots, X_{11}$ 构成，即

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_{11})$$

基于泰勒级数的一阶近似函数，被测量 Y 的估计值 y 为由各输入量 x_i 按数学模型确定的函数关系 f 计算得到：

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_{11})$$

根据不确定度传播率通用公式，确定合成标准不确定度 u_c ，并将其作为 Y 的测量标准不确定度，

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{11} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=i+1}^{11} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}$$

式中， $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为灵敏度系数，由 c_i 表示。

由于各输入量之间相互独立， c_i 的绝对值为 1，由函数误差理论可得：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{11} u_i^2(x_i)$$

2、(10~2000)Hz 条件下加速度幅值和相位的测量不确定度

1) 动态信号分析仪的幅值测量误差引入的标准不确定度分量 $u_{1,rel}(S)$

动态信号分析仪的幅值测量误差优于 0.5%，其标准不确定度分量为：

$$u_{1,rel}(S) = \frac{0.5\%}{2} = 0.25\%$$

2) 参考加速度套组引入的标准不确定度分量 $u_{2,rel}(S)$

参考加速度计套组的年稳定性优于 0.5%，引入的幅值误差优于 0.2%，按照均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{2,rel}(S) = 0.24\%$$

- 3) 振动台横向对测量的影响引入的标准不确定度分量 $u_{3,rel}(S)$

参照标准振动台证书，假设在参考条件 160Hz 和 100m/s² 下，标准振动台的横向振动比为 1.5%，其带给电压测量的幅值误差为 0.16%，按均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{3,rel}(S) = \frac{0.16\%}{\sqrt{3}} = 0.092\%$$

- 4) 参考放大器增益挡偏差的影响引入的标准不确定度分量 $u_{4,rel}(S)$

按照均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{4,rel}(S) = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.058\%$$

- 5) 传感器频率响应偏差引入的标准不确定度分量 $u_{5,rel}(S)$

在通频带（20~5k）Hz 内，对振动传感器进行频率响应测试，测得其加速度幅值最大误差为 0.5%，按照均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{5,rel}(S) = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.289\%$$

- 6) 环境扰动的影响引入的标准不确定度分量 $u_{6,rel}(S)$

温度、微小振动及噪声对测量结果扰动的影响，假设其加速度幅值和相位误差小于±0.05%，按正态分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{6,rel}(S) = \frac{0.05\%}{\sqrt{3}} = 0.029\%$$

- 7) 温度探针摇摆的影响引入的标准不确定度分量 $u_{7,rel}(S)$

假设被校复合传感器温度探针部分与复合传感器本体之间相对运动产生的加速度幅值误差为±0.2%，按均匀分布，其标准不确定度分量为：

$$u_{7,rel}(S) = \frac{0.2\%}{\sqrt{3}} = 0.15\%$$

- 8) 测量重复性引入的不确定度分量 $u_{8,rel}(S)$

在参考条件下，参考灵敏度进行重复 10 次测量，假设验标准偏差：

$$u_{8,rel}(S) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.03\%$$

确定参考条件下加速度幅值和相位标准不确定度分量见表 2。

表 3 参考条件下标准不确定度分量

序号	不确定度来源	标准不确定度分量 $u_{i,rel}$	加速度幅值 (%)
1	动态信号分析仪的幅值测量误差	$u_{1,rel}$	0.25
2	参考加速度计套组对测量的影响	$u_{2,rel}$	0.24
3	干扰电压对测量的影响	$u_{3,rel}$	0.092
4	振动台横向加速度对测量的影响	$u_{4,rel}$	0.058
5	传感器频率响应偏差对测量的影响	$u_{5,rel}$	0.289
6	环境扰动的影响	$u_{6,rel}$	0.029
7	温度探针摇摆的影响	$u_{7,rel}$	0.015
8	测量重复性	$u_{8,rel}$	0.03

合成标准不确定度计算公式：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} = 0.5\%$$

3、 (10~2000)Hz 频率范围内校准结果的扩展不确定度

取 k=2，则校准结果的扩展不确定度为：

$$U_{rel} = 1.0\%$$

动车组转向架振动温度复合传感器校准试验报告

1. 试验目的

用校准规范中的校准方法对动车组转向架振动温度复合传感器（以下简称复合传感器）的各项技术指标，判断校准方法是否可行。

2. 试验地点

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所振动冲击实验室。

3. 环境条件

温度 22.9℃，相对湿度 42.6%。

4. 样品形式

单向和三向振动温度复合传感器。

5. 试验用装置

低频振动标准装置、中频振动标准装置、高频振动标准装置、冲击加速度标准装置、温度箱。

6. 试验方法

6.1 零点电压

（1）轴箱振动温度复合传感器

复合传感器连接器 1、2 针为垂向加速度输出，3、4 针为横向加速度输出。连接复合传感器测试工装。测试工装为恒流源，为复合传感器加速度测量供电。保持复合传感器探针水平 0° 静止放置在桌面上，分别测量复合传感器连接器 1（接恒流+）、2（接恒流-）针为垂向零点电压，3（接恒流+）、4（接恒流-）为横向零点电压，即测试工装接线端子 1、2 位和 3、4 位之间的输出电压。

（2）齿轮箱振动温度复合传感器

复合传感器的振动信号连接器 1 针和 4 针为小齿轮电机侧、车轮侧垂向加速度输出，5 针和 8 针为大齿轮电机侧、车轮侧垂向加速度输出。连接复合传感器测试工装。测试工装为恒流源，为复合传感器加速度测量供电。保持复合传感器探针水平 0° 静止放置在桌面上，分别测量振动信号连接器 1 针（接恒流+）和 4 针（接恒流-）为小齿轮侧零点电压，5 针（接恒流+）和 8 针（接恒流-）为大齿轮侧零点电压。

（3）电机振动温度复合传感器

电机传动端振动温度复合传感器连接器的 6 针（接恒流+）和 7 针（接恒流-）为径向振动加速度信号输出。电机定子和非传动端振动温度复合传感器振动信号

连接器的 1 针（接恒流+）和 4 针（接恒流-）为非传动端振动加速度输出（定子端无振动加速度信号）。连接复合传感器测试工装。测试工装为恒流源，为复合传感器加速度测量供电。保持复合传感器探针水平 0° 静止放置在桌面上，分别测量电机传动端振动温度复合传感器连接器的 6 针和 7 针输出电压，电机定子和非传动端振动温度复合传感器振动信号连接器的 1 针和 4 针输出电压。

6.2 灵敏度幅频

将复合传感器、标准传感器同轴背靠背安装在振动台中心位置。在工作频率范围内选取 160Hz 为基准点，在 0.5Hz~10000Hz 间均匀选取 6-8 个点，振动台产生的加速度可以保持不变，记录被校传感器输出随频率变化的关系曲线。校准各频率下的灵敏度，每个频率下灵敏度测三次，计算复合传感器频率响应，换算成传感器频响灵敏度。

按下式计算频率响应误差：

$$\gamma_f = \frac{(\overline{S_{f_l}} - \overline{S_{160}})_{\max}}{S_{160}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： γ_f ——最大频率响应误差，%；

$\overline{S_{f_l}}$ ——某一频率下灵敏度三次算术平均值，mV/(m·s⁻²)或 pC/(m·s⁻²)；

$\overline{S_{160}}$ ——160Hz 时被测加速度传感器灵敏度算术平均值，在试验精度允许时，也可用参考灵敏度，pC/(m·s⁻²)；

也可以用对数表示，按下式计算：

$$\gamma_f = 20 \times \lg(1 + \gamma_f) \quad (2)$$

式中： γ_f ——用对数表示的最大频率响应误差，dB；

本次校准复合传感器频率范围 0.5 Hz~10000Hz，最大频率响应误差<±3dB，由以上公示，计算：

$$-3\text{dB} = 20 \times \lg(1 + \gamma_f), \quad \gamma_f \approx -29.21\%$$

$$3\text{dB} = 20 \times \lg(1 + \gamma_f), \quad \gamma_f \approx 41.4\%$$

复合传感器的输出电压与所受到的加速度值之比即为灵敏度。复合传感器的灵敏度幅值 S_2 按下式计算：

$$S_2 = \frac{X_2}{X_1} \times S_1 \quad (3)$$

式中 S_1 —— 参考加速度计灵敏度；

X_1 —— 参考加速度计输出值，mV；

X_2 —— 复合传感器输出值，mV。

6.3 灵敏度幅值线性度

(1) 加速度 $\leq 100g$ ，建议使用振动台测试。

与上述 6.2 方法相同。

(2) 加速度范围 $10g \sim 100000g$ ，建议使用冲击的方法测试。

选取检测方向为测试方向，将被测复合传感器安装在冲击台上，接好线缆。调节冲击台量值，可以用标准加速度峰值和相应的加速度峰值灵敏度，通过最小二乘法进行线性回归运算后获得。加速度按 1、2、5、8、10（或它们的 $10n$ 倍， $n=1、2、3、\dots$ ） m/s^2 ，选取 5~8 个校准点，但必须包括最大测量加速度值在内。

由于加速度幅值范围较大，因此采用冲击法检定，采用最小二乘法做复合传感器线性度计算：

$$\gamma = \frac{S - S_0}{S_0} \times 100\%$$

式中： γ —— 幅值线性度，%；

S —— 拟合直线上加速度计灵敏度， $mV/(m \cdot s^{-2})$ ；

S_0 —— 拟合直线截距， $mV/(m \cdot s^{-2})$ 。

应以要求的加速度增量给出幅值线性度。

其中拟合直线具有下列形式：

$$S = Ka + S_0 \quad (4)$$

式中： K —— 拟合直线斜率；

a —— 试验加速度， m/s^2 ；

K 、 S_0 按下式计算：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n a_i S_i - \bar{a} \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 - \bar{a} \sum_{i=1}^n a_i} \quad (5)$$

$$S_0 = \frac{\bar{S} \sum_{i=1}^n a_i^2 - \bar{a} \sum_{i=1}^n a_i S_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 - \bar{a} \sum_{i=1}^n a_i} \quad (6)$$

式中： $\bar{a}$ ——校准加速度的算术平均值， m/s^2 ；

$\bar{S}$ ——各加速度校准点灵敏度算术平均值， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ；

a_i ——各校准点加速度值， m/s^2 ；

S_i ——各校准点灵敏度， $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ；

n ——校准点数；

$\bar{a}$ 、 $\bar{S}$ 按下式计算：

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (7)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (8)$$

6.4 横向振动灵敏度比

将被测产品刚性安装在横向灵敏度校准台上（该装置横向运动应小于 1%，信噪比应大于 20dB），复合传感器的机械轴（敏感轴）与振动方向垂直。分别在角度 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 以及 315° 下，测试传感器的输出。测试的数据与垂向灵敏度的比值。

测试过程中，避免线缆摆动/晃动，影响振动台振动，避免传感器敏感轴受到振动干扰，而影响最终测试结果。



横向灵敏度比计算公式如下：

$$k=S_{*}/S_0\times100\% \tag{9}$$

式中：k——横向灵敏度比。

S_{*} ——旋转不同角度下的灵敏度。

S_0 ——垂向灵敏度。

6.5 灵敏度温度响应

用比较法在规定的温度范围内，对被测产品进行灵敏度温度响应校准。

被测产品和标准加速度计同轴刚性地连接到振动台两端并接好线缆，使被测传感器置于恒温箱内，标准加速度计处于箱外。

选取160Hz作为基准点，依次选取-40℃，25℃，+70℃三个温度点进行传感器振动灵敏度测试。校准加速度值10g，各点温度均恒温15min后进行灵敏度测量。计算方法见式（3）。

6.6 安装谐振频率

将待测传感器安装表面清洁后安装到高精度夹具安装台，待测传感器位置与工作姿态相同。用力锤（钢）为激励信号，该激励信号同步触发响应采集器（激光测振仪）采集测量点的速度信号。依据规程所需方法，在待测传感器非模态接线位置确定测量点，测量点位置清洁后粘贴反光贴纸。

测试过程中，力锤激励信号法激励频率范围应覆盖 30kHz，满足激振需求。完成试验，分析激励信号与响应信号得到待测传感器的模态信息，包括安装谐振频率等参数。

7. 试验结果

7.1 零点电压

复合传感器名称	位置/方向	零点（V）
轴箱振动温度复合传感器	垂向	12.61
齿轮箱振动温度复合传感器（电机侧）	小齿轮侧	12.25
齿轮箱振动温度复合传感器 2（车轮侧）	小齿轮侧	12.27
电机传动端振动温度复合传感器	传动端	12.29
电机定子和非传动端振动温度复合传感器	非传动端	12.74

7.2 频率响应

轴箱振动温度复合传感器频率响应：

位置	频率/(Hz)	灵敏度/(mV/g)	相对偏差/(%)
垂向	10	1.047	-1.32
	30	1.040	-1.98
	160	1.061	0.00
	400	1.042	-1.79
	600	1.011	-4.71
	2000	0.966	-8.95
横向	10	1.037	-0.48
	30	1.040	-0.19
	160	1.042	0.00
	400	1.044	0.19
	600	1.044	0.19
	2000	1.045	0.29

齿轮箱振动温度复合传感器（电机侧）频率响应：

位置	频率/(Hz)	灵敏度/(mV/g)	相对偏差/(%)
小齿轮侧	10	1.050	2.84
	30	1.043	2.15
	160	1.021	0.00
	400	1.012	-0.88
	600	1.006	-1.47
	2000	0.955	-6.46
大齿轮侧	10	1.063	2.11
	30	1.052	1.06
	160	1.041	0.00
	400	1.033	-0.77
	600	1.026	-1.44
	2000	0.997	-4.23

7.3 幅值线性度

位置/方向	灵敏度 (mV/g)				
	100g	200g	300g	400g	500g
垂向	10.28	10.29	10.28	10.31	10.19
小齿轮侧/正	10.54	10.56	10.68	10.66	10.75
小齿轮侧/负	10.55	10.54	10.58	10.46	10.63
大齿轮侧/正	10.48	10.65	10.61	10.68	10.71
大齿轮侧/负	10.61	10.61	10.7	10.82	10.81

注：正：安装接触面向上，针型传感器部分向下。负：针型传感器部分向下，安装接触面向上。

7.4 温度灵敏度：

轴箱振动温度复合传感器

位置	温度(℃)	灵敏度 mV/g	温漂 (m V/g)/℃
垂向	-40	9.61	-0.01
	25	10.04	/
	125	10.48	0.00
横向	-40	9.91	-0.01
	25	10.27	/
	125	10.96	0.01

齿轮箱振动温度复合传感器（电机侧）

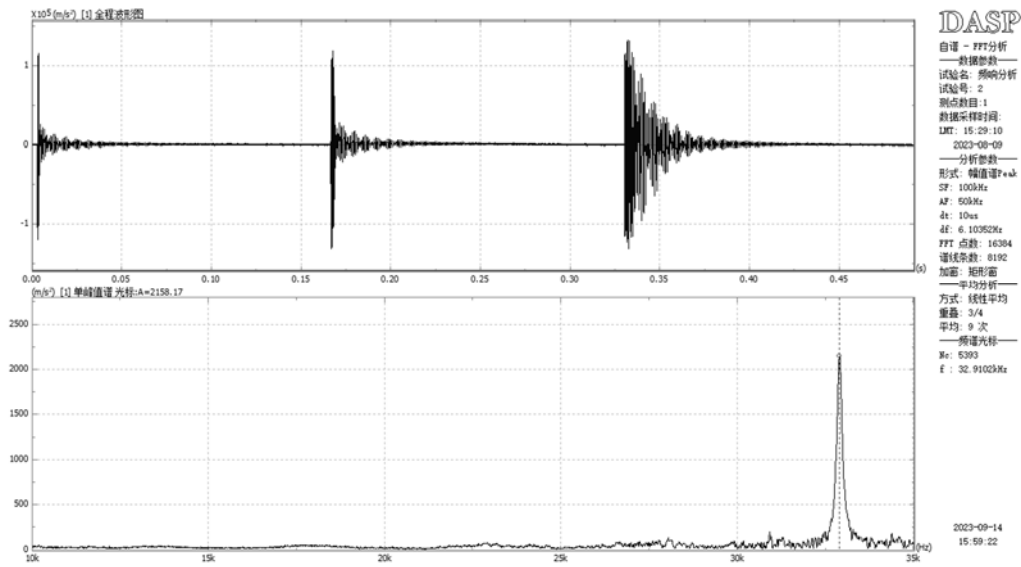
位置	温度(℃)	灵敏度 mV/g	温漂 (m V/g)/℃
小齿轮侧	-40	9.97	-0.01
	25	10.33	/
	125	10.81	0.00
大齿轮侧	-40	9.97	-0.01
	25	10.38	/
	125	11.01	0.01

7,5 横向振动灵敏度比

复合传感器名称	位置/方向	转动角度/(°)	灵敏度/(mV/g)	横向振动灵敏度比/(%)
轴箱振动温度复合传感器	垂直向	0	0.125	1.25
		45	0.168	1.67
		90	0.169	1.68
		135	0.127	1.26
		180	0.094	0.94
		225	0.102	1.02
		270	0.102	1.02
		315	0.219	2.18
	水平向	0	0.111	1.12
		45	0.206	2.09
		90	0.174	1.76
		135	0.156	1.58
		180	0.145	1.47
		225	0.174	1.76
		270	0.126	1.28
		315	0.108	1.09

复合传感器名称	位置/方向	转动角度/(°)	灵敏度/(mV/g)	横向振动灵敏度比/(%)
齿轮箱振动温度复合传感器（电机侧）	小齿轮侧	0	0.127	1.27
		45	0.169	1.69
		90	0.085	0.85
		135	0.132	1.32
		180	0.095	0.94
		225	0.129	1.02
		270	0.013	1.02
		315	0.131	2.18
齿轮箱振动温度复合传感器（电机侧）	大齿轮侧	0	0.133	1.12
		45	0.135	2.09
		90	0.134	1.76
		135	0.134	1.58
		180	0.113	1.47
		225	0.111	1.76
		270	0.126	1.28
		315	0.215	1.09

7.6、安装谐振频率测试图谱



安装谐振频率>10kHz。

8. 试验结论

通过试验证明，校准规范规定的校准方法可行，能够满足动车组转向架振动温度复合传感器的校准需要。