

面向 MEMS 陀螺仪自动化测试的数据采集方案

全套 DAQ 解决方案，尽在度纬科技

度纬科技 Application Notes-076-V1.0

<https://www.doewe.com>

一、方案概述

芯片级 MEMS 陀螺仪/IMU（以陀螺通道为主）的性能评估与校准，难点往往不在“能测到数据”，而在于“输入工况可控、数据一致可追溯、计算口径统一、结论可复现”。因此，本文给出一套面向芯片级 MEMS 陀螺/IMU 的自动化测试方案，目标是把测试过程标准化并实现一键化输出结果。

方案系统由：数据采集与分析系统、自动化测试软件、角振动台、双轴位置台、温箱内置速率转台一体化系统组成，可覆盖静态、动态与温度相关的关键指标测试。数据采集与分析系统作为统一采集与控制平台，完成多通道同步采集、长时间记录与基础时域/频域分析；自动化测试软件运行于采集系统上，实现测试台联动控制、测试序列编排、数据自动处理、指标计算与报告输出。温箱内置速率转台提供温控下稳定角速度激励，用于标度因数及派生项、阈值/分辨率、温度灵敏度/温漂等测试；双轴位置台提供姿态精确翻转，用于零偏加速度灵敏度（g 敏感）；角振动台提供可控角振动激励，用于幅频/相频与带宽等动态指标测试。测试系统结构图如下：

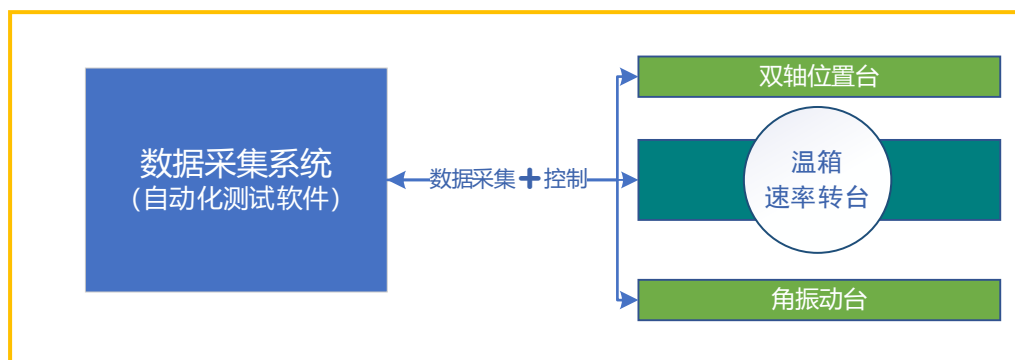


图 1 测试系统结构示意图

实际测试时，被测陀螺芯片安装在测试台工装上并完成供电/信号连接；软件控制测试台施加角速度/角振动/姿态与温度等激励，采集系统同步采集陀螺输出并长时间记录；测试结束后软件自动完成数据处理与指标计算，给出判定结论并输出报告。

二、测试依据

2.1 参考标准

本方案面向芯片级 MEMS 陀螺仪/IMU（以陀螺通道为主）的性能测试与校准，需选取一套能够系统规定“测试项目、测试方法与结果表达”的规范作为技术主线依据。JJF 1535—2015《微机电（MEMS）陀螺仪校准规范》针对 MEMS 陀螺仪建立了完整的校准体系：在适用范围方面，以单敏感轴 MEMS 陀螺仪为主要对象，并对多敏感轴器件提供可参照的执行口径；在技术内容方面，将芯片级评估的关键性能指标固化为标准化条目，并给出相应的校准/测试方法及结果表达要求。

该规范覆盖芯片级测试的核心性能要素，包括：标度因数及其非线性度、不对称度与重复性；零偏及其稳定性与重复性；零偏温度灵敏度、零偏加速度灵敏度；角度随机游走（ARW）与带宽等。这些指标能够直接表征 MEMS 陀螺仪的静态精度、噪声水平、环境敏感性与动态响应能力。与此同时，规范对校准环境条件与关键设备配置提出了明确建议（例如速率转台、温箱、角振动装置与位置装置等及其推荐指标），便于将测试系统配置、设备选型指标与测试流程设计形成一致的工程实现路径。

综上，JJF 1535—2015 适合作为本方案芯片级 MEMS 陀螺仪/IMU 测试系统的主参考标准。若后续测试范围扩展至更高环境应力条件或模块级器件（如高等级 IMU 模块、FOG/HRG 模块等），可在此基础上补充相应的环境/可靠性标准与模块级测试规范，以满足扩展场景的适用性要求。

2.2 测试指标

类别	指标（通俗叫法）	标准名/备注
倍率/线性	标度因数 K	标度因数
倍率/线性	倍率弯不弯	标度因数非线性度
倍率/线性	正转反转一样吗	标度因数不对称度
倍率/稳定	同样测法多次是否一致	标度因数重复性
温度影响	温度变化对倍率影响	标度因数温度灵敏度
小信号能力	最小可检测角速度	阈值
小信号能力	最小可分辨的角速度变化量	分辨力
零点	不转时的等效角速度偏移	零偏

启动特性	上电多久进入稳定	准备时间
零点稳定	静止时零偏随时间的波动	零偏稳定性
零点重复	断电再上电后零偏是否回到同一水平	零偏重复性
姿态/加速度	1g 方向变化引起的零偏变化	零偏加速度灵敏度 (g 敏感)
噪声	噪声导致角度随时间发散的系数	角度随机游走系数 (ARW)
温度影响	温度变化对零偏影响	零偏温度灵敏度
动态能力	跟随频率能力	带宽

三、核心测试设备介绍

3.1 数据采集与分析系统

JJF 1535—2015 在速率转台类校准与频率特性校准中，配套给出了电压表（频率计）分辨率 6 位半、频谱分析仪 1 Hz~10 kHz、示波器 20 MHz 等推荐配置，用于输出测量、频谱/波形观测与记录。本方案采用基于 PXIe 的模块化数据采集与分析平台，将控制、采集与存储集成在同一机箱内，通过统一时基与同步采集实现多通道数据的一致记录，并在软件侧完成频率/周期测量与 FFT 频谱分析，从而对标准所需的“频率计/频谱仪/示波器”功能进行等效覆盖。

典型配置为：PXIe 机箱+嵌入式控制器+高速存储卡，满足长时间连续记录与数据回放复算；机箱提供 10 MHz 时钟 I/O，支持与转台/温控/位置台等系统统一时基与扩展同步；采集板卡按被测件输出形态（模拟/频率/数字）选配，兼顾时域观测、统计均值/离散度计算与频域分析需要。



图 2 数据采集模块产品图

3.2 速率转台与温控系统（温箱/温控速率转台一体）

速率转台是标度因数及其派生项（非线性度、不对称度、重复性）、阈值、分辨力等项目的核心标准装置；JJF 1535—2015 推荐速率精度及平稳度 0.05%（速率 $>10^{\circ}/s$ ），并配套温箱用于温度灵敏度相关项目，温箱推荐指标为温度偏差 $\pm 2^{\circ}C$ 、温度波动度 $1^{\circ}C$ 、温度均匀度 $2^{\circ}C$ 。

工程实现上，本方案优先采用温箱内置速率转台或温控转台一体化结构，使“角速率激励+温度环境”在同一工况下稳定建立，减少转运与装夹引入的误差源；同时由数采系统完成输出采样与点位数据管理，保证后续最小二乘拟合与统计计算可追溯。

3.3 双轴位置台（翻转台）

双轴位置台用于零偏加速度灵敏度（g 敏感）校准。JJF 1535—2015 推荐角位置精度 $\pm 3''$ 、角位置测量重复性 $\pm 3''$ ，并配套 6 位半电压表（频率计）用于输出测量。测量链路由数采系统完成静止采样、均值计算与姿态切换数据的自动归档，支持按“X/Y/Z 轴正反向分别指天”的 6 姿态流程形成标准化数据包，便于后续按规范口径计算每轴 g 敏感并取最大值作为结果。

3.4 角振动台（频率特性校准装置）

角振动台用于幅频特性、相频特性与带宽校准。JJF 1535—2015 推荐角振动台波形失真度 $\leq 2\%$ ，并给出频谱分析仪范围 1 Hz ~ 10 kHz、示波器 20 MHz 以及 6 位半电压表（频率计）作为配套测量设备。

本方案在测量链路上由数采系统同步采集角振动输入参考量与陀螺输出，完成幅值/相位提取与频点曲线拟合，满足标准对 1 Hz ~ 10 kHz 频率范围内频域分析与相位测量的需求，并形成可复算的原始记录与处理结果文件，支撑带宽（-3 dB）判定的全过程追溯。

3.5 自动化测试软件

JJF 1535—2015 对校准项目与计算方法给出了明确规定，本方案在此基础上增加自动化测试软件，统一调度转台/温控/位置台/角振动台与数采系统，固化测试序列与数据处理流程，实现点位/频点自动生成、采样与统计自动执行、指标计算与报告输出自动化，从而降低人工操作差异并提升测试一致性。



图 3 ASMC 测试与分析软件示意图

四、测试方法举例

4.1 测试准备

1. 环境确认：温度 $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ ；校准过程中温度波动 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ；湿度 $\leq 85\%$ ；周围无强电磁场/腐蚀介质/强震源。
2. 确认被测陀螺信息：型号、量程、输出形式（电压/频率/数字）、供电要求、通信与采样方式。
3. 检查连接：供电、信号线、接地、屏蔽是否正确；上位机/记录软件是否能稳定采样与存储。
4. 预热：按规范建议，上电预热一般 $\leq 30\text{ min}$ ；以输出稳定为准。
5. 统一记录：每次测试都记录日期、环境、设备编号/校准有效期、采样设置、姿态/轴向、输入点位、原始数据文件名。

模块 A：速率转台多点采样（用于 K 及其派生项）

用途：用一组“已知转速点”去拟合出输出与输入的关系，得到标度因数 K，并可派生非线性、不对称、重复性等。

1. 安装：将陀螺固定在速率转台上，使输入基准轴指天（与转台旋转轴对齐）。
2. 设置采样：检查电缆连接正确；启动转台；建议采样周期设为 1 s（或按需求）。
3. 预热：接通陀螺电源，预热一般不超过 30 min，直到输出稳定。
4. 点位规划：在量程内选取转速点（正转 ≥ 11 点、反转 ≥ 11 点，均包含最大输入角速率；点位尽量均匀；可参考 GB321 的 R5 系列选点并按需求圆整/删点）。
5. 逐点采样：按点位顺序逐一改变输入角速率；每个点等转台稳定后采样记录输出。小于 $\pm 100^{\circ}/\text{s}$ 的点每点 ≥ 30 个样本；大于等于 $\pm 100^{\circ}/\text{s}$ 的点每点 ≥ 5 个样本。

6. 两次零点测量：在校准开始与结束时，转台禁止 ($0^\circ/s$) 各测一次输出平均值；后续把它从各点输出均值中剔除，减少零偏对 K 的影响。
7. 重复：按需要隔一段时间重复整套流程（例如 30 min 后再测），用于统计重复性/稳定性。
8. 计算：每个点先求输出平均值；用最小二乘拟合“输出 = $K \times$ 输入 + 拟合零位”，得到 K（斜率）。

小提示：如果输出是频率/数字量，思路不变——核心是“输入点位与输出均值的线性拟合”。

模块 B：静止采样（用于零偏/准备时间/稳定性/ARW 等）

用途：在“输入角速度=0”时连续采样，得到零偏及其随时间变化特性。

1. 安装：将陀螺通过工装固定在校准地基上，使输入轴垂直于地基（姿态固定）。
2. 预热：接通电源，预热一般不超过 30 min，直到输出稳定。
3. 采样设置：设定采样间隔与总采样时间（建议至少数十分钟，做 ARW 时建议更长）。
4. 开始记录：保持陀螺静止不动，连续记录输出并保存原始数据。
5. 计算零偏：对采样输出求平均，再用 K 换算为等效角速度零偏 ($B0 = \text{平均输出}/K$)。
6. 如需重复性：断电-等待-上电-预热后重复上述采样，做多次统计。

4.2 具体测试流程举例

1. 标度因数 K

用到设备：速率转台 + 采样记录系统

操作步骤：

1. 按“模块 A”完整执行：安装对齐→预热→选点→逐点采样→两次零点测量→（可选）重复测量。
2. 对每个输入角速率点计算输出均值（剔除零点影响）。
3. 用最小二乘拟合得到 K（输出-输入直线的斜率）。

结果/判据：按最小二乘法建立输入—输出线性模型 $F_j = K \cdot \Omega_{ij} + F_0 + v_j$ ，K 为拟合直线斜率（标度因数）， F_0 为拟合零位， v_j 为拟合残差；输出应至少包含 K、 F_0 以及拟合残差统计量（如残差最大值/均方根等），并保留各校准点的输出均值与点位表，用于后续非线性度与不对称度计算。若按规范进行重复校准（Q 次），应给出 K 的统计结果（平均值及离散度）。

2. 标度因数非线性度

用到设备：速率转台 + 采样记录系统

操作步骤：

1. 复用“模块 A”的同一组数据或重新按模块 A 采集。

2. 用拟合直线计算每个点的理论输出，与实测均值做差。
3. 找到最大偏差并按标准公式归一化（相当于：最大偏差占满量程输入范围的比例）。
4. 如做多次重复，取平均作为最终结果。

结果/判据：在同一组校准点上，计算各点拟合直线输出值 F^j 与实测均值 F_j 的偏差，取最大偏差并按规范公式相对输入全量程进行归一化，得到单次非线性度 $K'm$ ；若重复校准 Q 次，则按规范对 $K'm$ 求平均得到 K' 。输出应包含 K' （或 $K'm$ 序列）、最大偏差对应点位以及归一化所用的 Ω_{max+} 、 Ω_{max-} 等参数。

3. 标度因数不对称度

用到设备：速率转台 + 采样记录系统

操作步骤：

1. 按模块 A 采集正转与反转两组点位数据。
2. 分别对正转数据拟合得到 $K+$ ，对反转数据拟合得到 $K-$ 。
3. 按标准公式计算 $K+$ 与 $K-$ 相对平均值的差异。
4. 如做多次重复，取平均作为最终结果。

结果/判据：分别对正转、反转输入角速率范围内的数据拟合得到 $K+$ 与 $K-$ ，按规范公式计算相对标度因数平均值 K^- 的差异，得到单次不对称度 Kmu ；若重复校准 Q 次，则对 Kmu 求平均得到 Ku 。输出应包含 $K+$ 、 $K-$ 、 K^- 及 Ku （或 Kmu 序列）。



图 4 数据采集卡产品图

度纬科技始终致力于在数据采集领域中实现创新、独特和可靠的产品方案。我们深知，这些要素是企业市场竞争中立足的基石。正因为如此，我们将创新的灵感来源于客户的真实应用需求，而非仅仅为了展示华而不实的产品特性。通过不断优化和提升数据采集方案，度纬科技助力合作伙伴迈向高效精准的未来。欢迎选择度纬科技（010-64327909），共同开启数据采集的新篇章。