# 车载六轴 IMU 芯片自动化测试解决方案

从六面姿态、稳态角速率到高 g 与动态频响的完整测试系统

全套 DAQ 解决方案，尽在度纬科技

度纬科技 Application Notes-086-V1.0

https://www.doewe.com

## 一、方案概述

惯性测量单元（Inertial Measurement Unit，简称 IMU）通常将三轴加速度计、三轴陀螺仪和温度传感器集成在同一器件内，可连续输出车辆在三个方向上的线加速度和角速度。车身稳定控制、组合导航、辅助驾驶、碰撞记录和姿态补偿等功能，都需要这些数据参与状态判断。IMU 输出的准确性和稳定性直接影响这些功能的判断质量，也使器件测试成为研发和应用验证中的重要环节。相应的测试不仅要确认六轴数据能否正常读取，还要把器件输出与真实的姿态、角速度、加速度、温度和振动输入逐项对应起来。

IMU 测试通常分为三部分：静态与稳态性能，包括零偏、比例因子、非线性、量程和横轴响应；温度、噪声与动态性能，包括零偏温漂、噪声密度、频率响应和数字滤波器带宽；供电、通信与功能检查，包括上电启动、工作电流、SPI/I²C 读写、自检、数据就绪中断和 FIFO。各测项所需的物理输入不同，靠单一设备无法完成全部验证。

完成这些测试，需要由不同设备分别提供可追溯的物理输入。单轴温控转台配合六面体换向定位夹具，用于六面姿态、稳态角速率及温度下的姿态或速率测试；精密离心机提供大于 1 g 的加速度输入，高低温试验箱用于固定姿态温度试验，直线振动台和角振动台分别用于加速度计与陀螺仪的动态响应测试。IMU 测试板和同步数据采集单元完成器件供电、通信及参考量采集，上位机软件负责任务编排、数据分析和报告输出。

基于上述测试需求，度纬科技将各类激励与环境台架、六面体换向定位夹具、IMU 测试板、同步数据采集单元和上位机软件集成为一套车载六轴 IMU 芯片自动化测试平台。各试验台架独立产生对应的机械或温度激励，被测芯片通过统一载盘在台架之间快速切换；共用控制与采集部分统一完成台架联动、时间同步和数据管理。

方案可覆盖常见六轴 IMU 的多量程测试。以加速度计量程覆盖±2 g 至±16 g、陀螺仪量程覆盖±250 °/s 至±2000 °/s 的一类器件为例，六面姿态测试利用重力，为加速度计的 X、Y、Z 轴分别提供约+1 g 和−1 g 的静态输入，精密离心机用于大于 1 g 的多点加速度，单轴转台用于

正、反向稳态角速度，直线振动台和角振动台分别用于加速度计与陀螺仪的动态响应测试。具体量程、温度点、频率范围和判定限值，按被测器件规格书及确认后的试验条件配置。

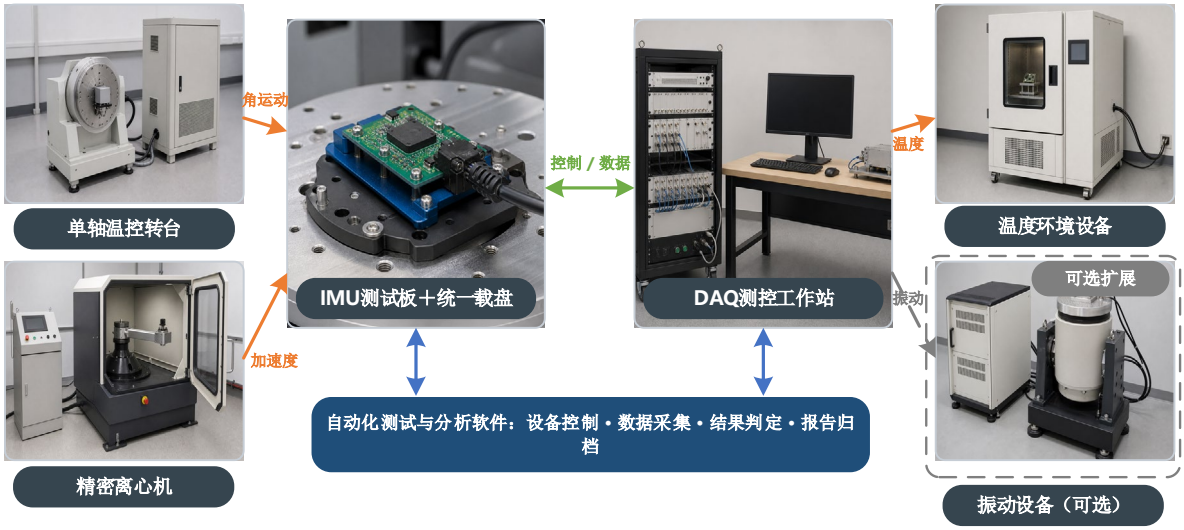



图 1 车载六轴 IMU 芯片自动化测试系统示意图

## 二、整体测试流程

测试任务由上位机软件统一建立。操作人员录入样品编号、器件类型、封装、安装方向和测试板版本，选择加速度计或陀螺仪测项，并调用相应的供电、量程、输出数据速率、温度点和机械激励参数。软件据此生成执行序列，同时列出本次任务需要使用的台架、夹具和参考传感器。

被测芯片安装在专用 IMU 测试板上，测试板再与统一载盘连接。统一载盘规定电气接口、机械基准和敏感轴方向，不同台架使用与自身结构匹配的适配板和夹具。更换台架时无需逐根重新接线，但仍需核对载盘、适配板和安装方向，确保软件中的坐标轴对应关系与实际安装方向一致，测试参数与当前台架及测项相匹配。对于高速旋转、离心和振动工况，夹具还需要检查锁紧、偏心、线缆固定和安全防护。

任务启动后，软件先识别测试板和台架适配板，检查门锁、急停、限位、参考传感器和通信状态。随后为被测芯片上电，完成身份寄存器读取、量程与滤波设置、自检配置和数据就绪检查。只有当前台架与所选测项匹配，且安全回路和设备状态均正常，系统才进入自动测试。

在六面与速率测试中，单轴温控转台先完成当前敏感轴的正、反方向测试，停稳后再按照六面体夹具的定位基准换面，依次完成 X、Y、Z 轴。精密离心测试按照设定加速度逐点加载，并在回程过程中复测相同点位，同时记录实测转速，将标定后的有效半径、夹具方向与被测输出关联保存。直线振动与角振动测试则按照设定频点或扫频轨迹运行，参考传感器和被测 IMU 数据在同一时间基准下记录。

温度测试可结合单轴温控转台，在不同温度点重复六面姿态或角速率测项；普通高低温箱适合多样品固定姿态温度循环，可连续记录静态输出、噪声、电流、通信、启动和自检随温度的变化。三轴零 g 温漂则通过各温度点的多姿态测试进行计算，以分离零偏、比例因子和微小安装角变化的影响。

每个测试点均保存设备设定值和实测参考量。转台记录实际角度或角速度；离心机记录实测转速，并关联标定后的有效半径、夹具方向和被测输出；振动系统记录参考加速度或参考角速度；温度测试记录芯片附近的参考温度。IMU 测试板按数据就绪事件读取六轴原始数据并记录时间戳。软件通过共同触发、测试点编号和时间戳，将外部参考量、被测输出、电源电压、电流及设备状态对应起来。

采集完成后，软件先检查报文连续性、数据就绪计数、FIFO 样本数和设备状态，再进行单位换算、坐标轴转换和参考量对齐。随后计算零偏、比例因子、非线性、温漂、噪声、幅值比、相位差和动态横轴响应，并按当前器件配置进行结果判定。通信中断、参考量异常或台架未稳定的数据点将被标记并从统计样本中剔除，原始记录和复测结果仍随任务保存。

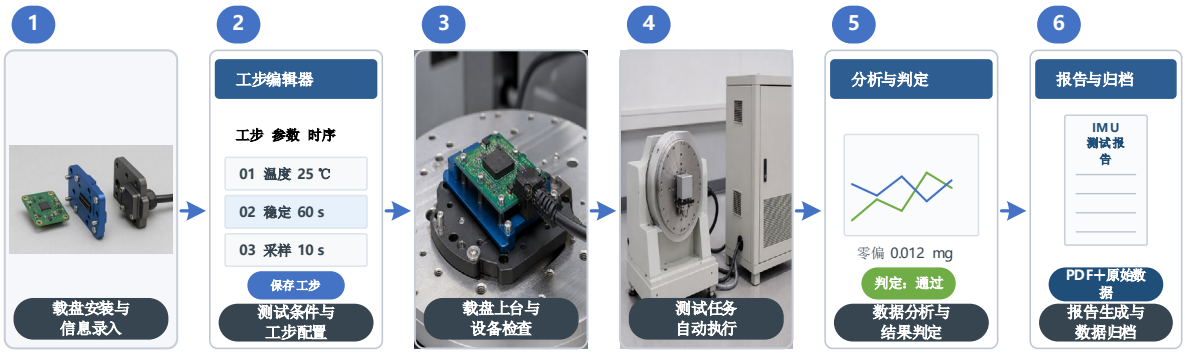



图 2 车载六轴 IMU 芯片自动化测试流程

表 1 列出了六轴 IMU 常见测项与主要处理内容。正式项目可根据器件规格、研发阶段和验证目的选择测项，表中未给出统一限值。

表 1 车载六轴 IMU 芯片常见测试项目

| 测试项目 | 测试方法 | 主要结果 |
| --- | --- | --- |
| 供电与工作模式 | 设置低、中、高供电点及不同工作模式，同步测量电压、电流和数字输出 | 上电状态、稳态电流、休眠电流、模式切换响应 |
| 六面姿态 | 使±X、±Y、±Z 方向依次与重力方向重合，记录三轴加速度与三轴角速度 | 零 g 偏置、约±1 g 比例因子、轴向极性、姿态下零速输出 |
| 稳态角速率 | 对每个敏感轴施加多个正、反向角速度点 | 陀螺仪量程、比例因子、非线性、正反向一致性和横轴响应 |

| 测试项目 | 测试方法 | 主要结果 |
| --- | --- | --- |
| 高 g 加速度 | 由离心机按实测转速和有效半径产生多个加速度点，换向后测试负方向 | 加速度计高 g 量程、比例因子、非线性和加载/卸载差异 |
| 温度特性 | 在低温、常温和高温点重复静态、六面或速率测试 | 零偏变化、比例因子变化、噪声、电流、通信及温度输出 |
| 静态噪声 | 在台架静止、配置和带宽固定的条件下连续采样 | RMS 噪声、标准差、噪声密度和功率谱密度 |
| 直线振动 | 以参考加速度传感器为基准进行定频或扫频测试 | 加速度计动态灵敏度、幅频/相频响应、滤波带宽和横轴响应 |
| 角振动 | 以编码器或参考角速度传感器为基准进行正弦角振动 | 陀螺仪动态灵敏度、幅频/相频响应、滤波带宽和横轴响应 |
| 通信与功能 | 执行 SPI/I²C 读写、自检、中断、FIFO 和通信恢复测试 | 接口正确性、数据更新周期、漏样、溢出、启动时间和自检响应 |

# 三、测试系统组成

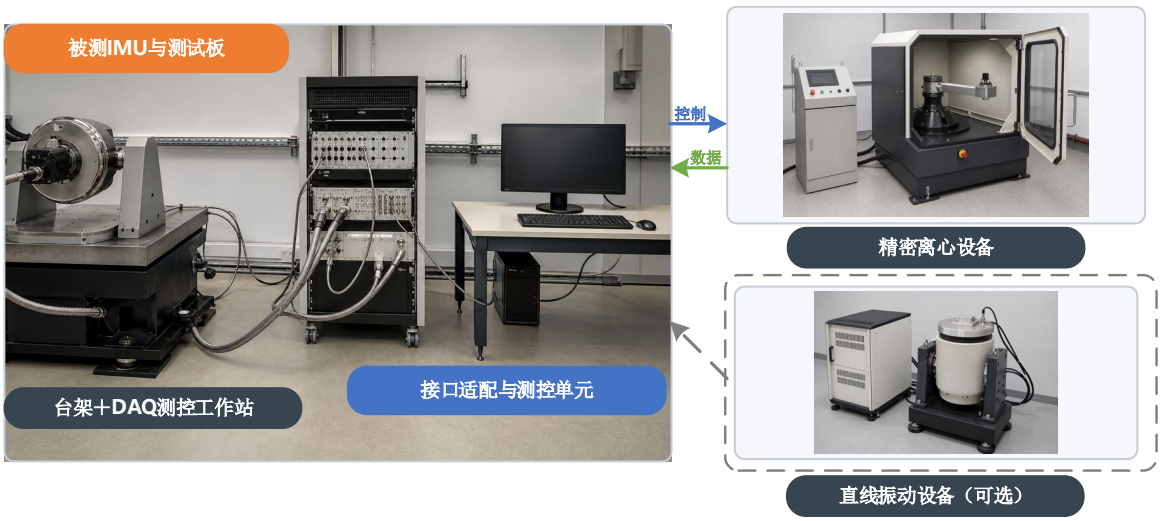



图 3 车载六轴 IMU 芯片自动化测试系统结构

## 3.1 测试激励台架

本方案中的各类激励设备采用独立台架。单轴温控转台兼顾六面姿态、稳态角速率和温度环境；精密离心机产生高 g 径向加速度；直线振动台向加速度计施加可控正弦加速度；角振动台向陀螺仪施加周期性角运动；普通高低温箱用于固定姿态静态温度试验或多样品温度循环。各设备通过统一的控制、同步和安全接口接入上位机，但保留各自的控制器、参考测量和保护装置。

单轴转台一次只对准一个敏感轴。六面体换向定位夹具设置±X、±Y、±Z 六个定位面，完成一个方向后先停台，再换到下一定位面。该方式既可利用重力完成加速度计六面测试，也可将三个陀螺仪敏感轴依次对准转轴。若需要在温度环境下重复姿态或速率测试，转台温控范围、温场均匀度、稳定时间以及温度下的定位和速率性能都应纳入选型与校准。

精密离心机通过旋转角速度和有效半径产生加速度，适合完成大于 1 g 的多点加载。设备配置编码器、有效半径标定、可翻转夹具、配重、动平衡和封闭防护。直线振动系统以靠近被测芯片的参考加速度传感器作为反馈，角振动系统使用高分辨率编码器或参考角速度传感器，两者均需保证实际激励、参考量和被测输出同步记录。

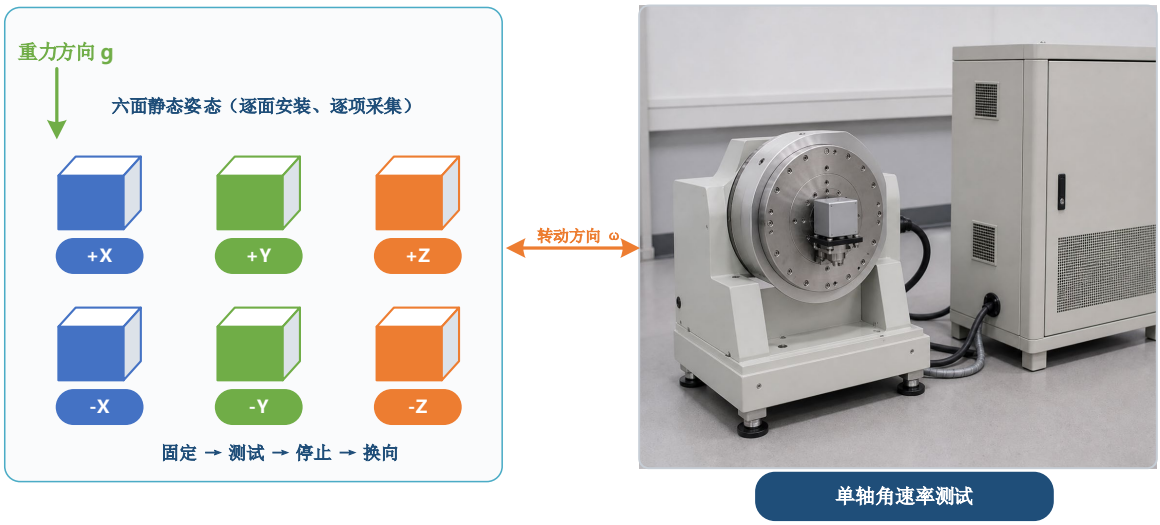



图 4 六面姿态与单轴角速率测试方法

## 3.2 IMU 测试板与跨台架夹具

IMU 测试板承担器件供电、电源滤波与去耦、接口保护、寄存器配置和数字数据读取。板上控制器可作为 SPI 或 I²C 主机，完成量程、输出数据速率、数字低通滤波器、自检、FIFO、中断和低功耗模式设置，并按数据就绪事件读取三轴加速度、三轴角速度和温度原始值。为便于检查接口电平和时序，关键电源、时钟、数据和中断信号保留测试点。

测试板、统一载盘和台架适配板采用三级结构。测试板随器件型号变化，统一载盘保持连接器、机械基准和防反插方式一致，各台架适配板负责与转台、离心机、振动夹具或温箱安装面连接。软件分别识别测试板和适配板，加载相应的引脚映射、坐标方向、量程参数和台架运行限制。这样既能减少跨台架换线，也能在更换 IMU 封装或接口时保留大部分系统。

高速旋转和离心工况下，数据传输可根据台架结构采用滑环实时传输或旋转端缓存；振动工况下则需控制测试板、载盘和线缆的质量与刚度，避免附加结构共振影响参考输入。无论采用哪种方式，都应保存测试板版本、夹具方向和安装状态，避免把换面或装夹误差当成器件性能。

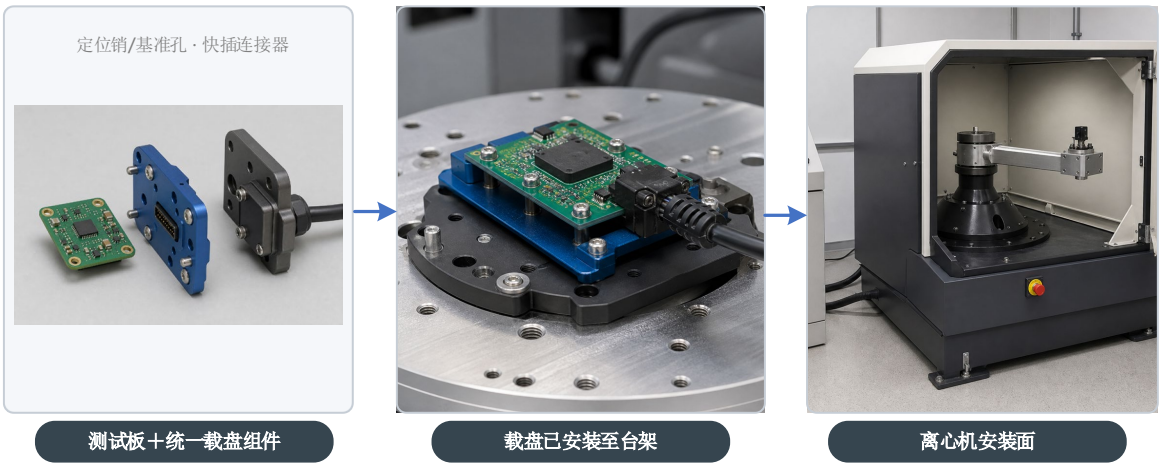



图 5 IMU 测试板与统一载盘跨台架切换示意图

## 3.3 数据采集与同步

数据采集部分记录转台编码器、离心机转速、参考加速度、参考角速度、芯片附近温度、同步触发以及供电电压和电流。IMU 自身的六轴数字数据由测试板就近读取。两类数据来源不同：外部参考量按采集通道的时间基准记录，IMU 数据按 DATA_RDY 事件或接口读取时刻记录，系统在采集时分别保留各自的时间信息和测试点标识。

系统通过共同触发、硬件时间戳或明确的测试点编号建立对应关系。稳态测试在台架达到目标值并稳定后取样；扫频与连续运动测试则保留参考波形和 IMU 原始序列，再按时间戳对齐。采集阶段完整保留器件原始输出，噪声和频率响应分析直接使用原始序列。台架校准信息、采样率、滤波配置和坐标变换参数与结果一起保存，便于复核误差来源。

## 3.4 自动化测试与分析软件

测试软件是整套系统的统一操作入口。调试模式用于设备点动、回零、寄存器读写、波形观察和参考通道检查；自动模式按测试模板执行上电、配置、联锁确认、激励控制、同步采集、稳定判断和结果计算。不同 IMU 的寄存器表、数据格式、比例因子、温度换算和判定限值均作为器件配置管理，台架控制和报告框架可继续复用。

每个测试点保存样品编号、测试板与适配板版本、安装方向、器件寄存器配置、设备设定值、实测参考量、六轴原始数据、温度、电压、电流和设备状态。软件可输出零偏与比例因子、最佳直线拟合结果、温度曲线、噪声谱、幅频/相频曲线以及 PASS/FAIL 结论。超限点可回看原始波形、通信状态和台架运行记录，便于区分器件异常、安装误差和激励不稳定。

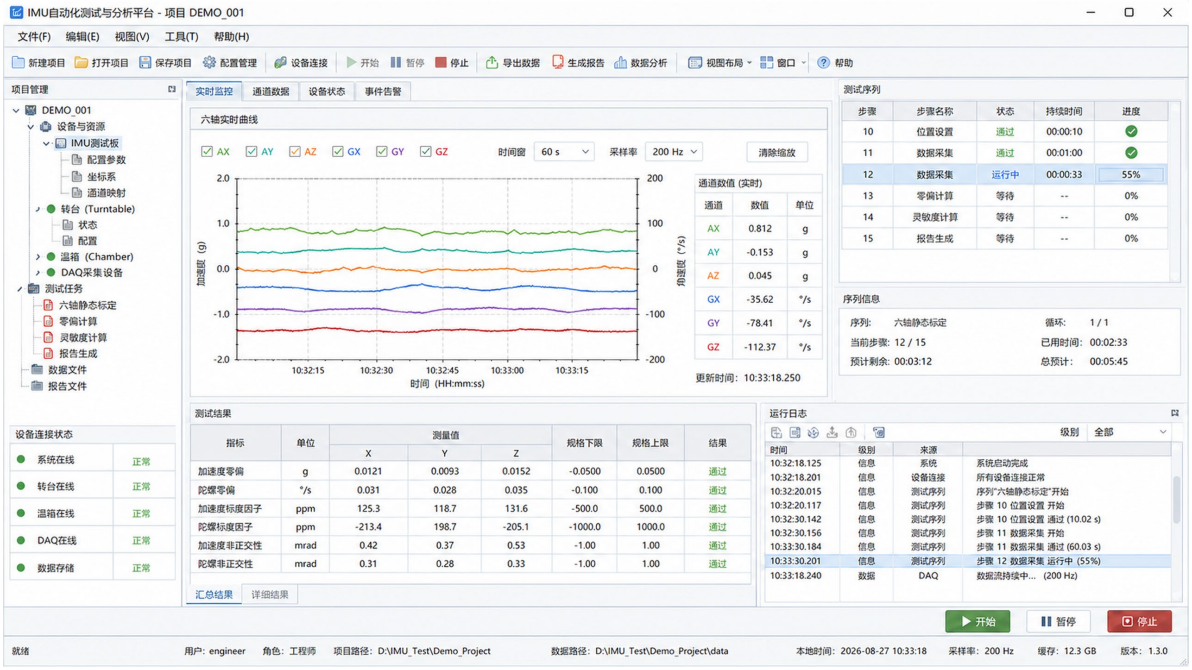



图 6 IMU 自动化测试与分析软件界面示意图

# 四、典型测试方法

## 4.1 六面姿态与稳态角速率测试

六面测试依次使被测芯片的+X、-X、+Y、-Y、+Z 和-Z 方向与重力方向重合。与重力同轴的敏感轴获得约+1 g 或-1 g 输入，另外两轴的理论输入接近 0 g。对同一轴，正、反两个姿态输出的平均值可用于估算零 g 偏置，输出差与实测重力输入差之比可用于计算比例因子。夹具倾斜、安装角误差和三轴不正交都会投影到另外两轴。测试结果先以横轴总响应表述，并结合姿态与安装误差修正结果进一步评估器件交叉轴灵敏度。

陀螺仪速率测试先将待测敏感轴与转台转轴对准，在各量程内设置零点、若干正向和反向中间点以及接近满量程的点。每个点使用编码器实测角速度作为参考，待转速稳定后采集数据。软件对参考角速度与数字输出进行线性拟合，计算比例因子和非线性，并比较相同绝对值下的正反向结果、升速与降速结果以及测试前后的零速输出。完成一个轴后，转台停稳并换面，再重复其余两轴。

## 4.2 高 g 加速度与温度测试

六面法只能提供约±1 g 输入。需要验证更高量程时，精密离心机按照 $a=\omega^2 r$ 计算离心加速度，其中 ω 为换算成 rad/s 的编码器实测角速度，r 为旋转中心到芯片敏感中心的标定有效半径，并根据安装姿态修正重力分量。每个加速度点稳定后同步记录转速、夹具位置、设备状态和 IMU 输出。负方向测试通过翻转夹具获得，换轴后重新确认敏感中心位置和动平衡。

多点加载可用于计算高 g 段比例因子和非线性，加载与卸载过程中重复相同点位还可观察回程差异。最高测试点应低于设备额定极限并保留安全余量，具体点位数量、保持时间、参考加速度精度和测量不确定度需结合器件规格与试验目的确定。

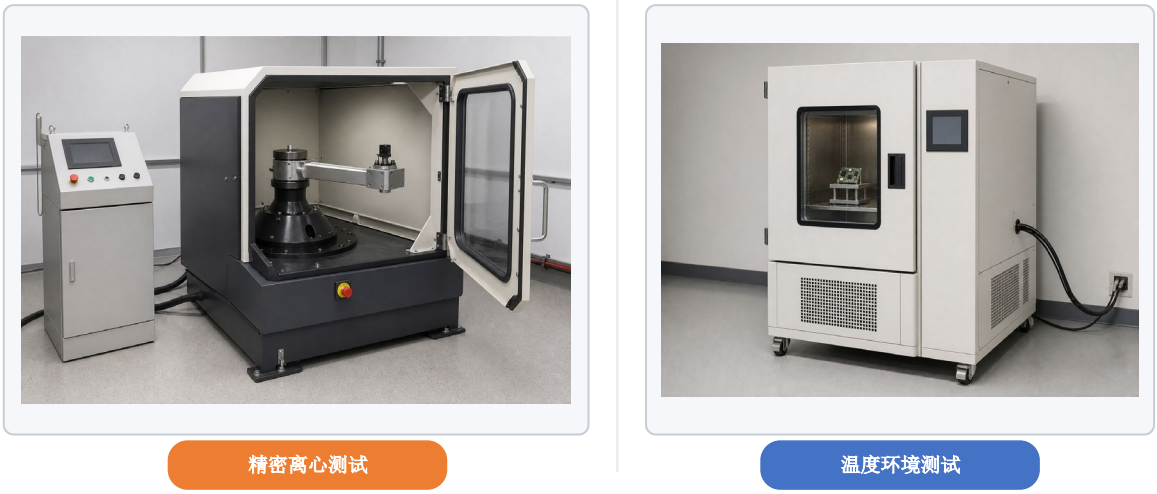



图 7 精密离心与温度测试方法示意图

温度测试首先在芯片附近布置参考温度传感器，待参考温度和设备状态稳定后再采集。对于陀螺仪，可在静止状态下计算各温度点的零速输出和噪声；对于加速度计，固定姿态数据用于观察静态输出、噪声、电流、通信和启动状态随温度的变化，各温度点的多姿态数据则用于计算三轴零 g 偏置和比例因子随温度的变化。

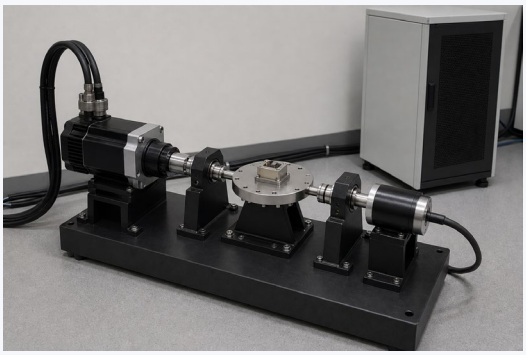
## 4.3 直线振动与角振动测试

直线振动测试用于加速度计动态灵敏度、幅频响应、相频响应、数字低通滤波器带宽和动态横轴响应。参考加速度传感器与 IMU 安装在同一刚性夹具上，并尽量靠近。正式测试前先用较低幅值扫频，检查夹具紧固和目标频段内的共振；随后在选定滤波配置下进行定频或扫频测试，软件计算 IMU 待测轴相对参考加速度的幅值比和相位差，同时记录另外两轴响应。

角振动测试用于陀螺仪动态角速度响应和滤波带宽。台架驱动被测件绕转轴周期性正反向摆动，参考角速度可由高分辨率编码器的角位移求导得到，也可由独立角速度传感器直接测量。正弦角振动的角速度峰值与频率和角位移幅值有关，设置扫频条件时需同步校核角位移、角速度、驱动能力和器件量程，并在各项均满足台架和器件要求的范围内调整频率。



直线振动测试



角振动测试

图 8 直线振动与角振动动态响应测试示意图

动态测试中，参考通道采样率和器件输出数据速率应高于最高测试频率的两倍，并保留抗混叠余量。每个数字滤波档位需要匹配其允许的输出数据速率，再分别获得幅频和相频曲线。若以幅值比降至低频基准的 0.707 倍确定−3 dB 截止频率，扫频上限还应高于目标截止频率。结构耐久和随机振动测试作为本方案的选配内容，可根据对应产品标准配置谱形、量级和持续时间。

### 4.4 供电、通信与功能测试

供电测试在器件规定的低、中、高电压点执行，记录电压、电流、复位、首次通信、数据就绪和首帧有效数据时刻，用于区分“寄存器可访问”和“传感器数据稳定更新”两个时间点。不同工作模式下分别测量稳态电流，模式切换和休眠唤醒过程保留电流变化及数字输出。

SPI 或 I²C 测试包括寄存器读写、连续数据读取、时钟速率切换和异常恢复。数据就绪中断用于统计实际更新周期和抖动。FIFO 测试按当前样本布局检查字节数、数据顺序、溢出状态和漏样情况，每帧数据的实际更新周期以 DATA_RDY 标志或帧内时间信息为准；主机分批读取 FIFO 的间隔作为通信调度信息单独记录。自检则比较自检关闭和开启时各轴输出变化，并按对应器件规定的工厂参考值或判定方法计算结果。

## 五、方案特点

度纬科技六轴 IMU 芯片自动化测试方案将不同物理原理的试验设备接入同一套供电、采集、同步和软件系统。各台架保持独立校准与安全防护，被测芯片通过统一载盘切换，既减少重复建设，也避免把转台、离心和振动机构强行组合后引入额外偏心、共振和热传导影响。方案具体优势和特点如下：

- 单轴温控转台与六面体换向定位夹具兼顾约±1 g 六面姿态、三轴稳态角速率和温度环境测试；测试时采用停台换面，三个敏感轴依次完成测试。

- 精密离心机将加速度输入扩展至六面法 1 g 以外的高 g 范围；直线振动台和角振动台分别验证加速度计与陀螺仪的动态幅值、相位和滤波响应，构成覆盖静态、稳态和动态响应的可选测试组合。
- 测试板、统一载盘和适配板分层设计，便于更换封装、接口和夹具。
- 外部参考量、六轴原始数据、电压、电流、温度和设备状态采用共同触发、时间戳或测试点编号对应，计算结果可回溯到原始数据和当时的试验条件。
- 软件按器件配置管理寄存器、比例因子、滤波、采样率和判定限值，自动执行设备检查、数据采集、异常复测、指标计算和报告导出，也保留单点调试和波形复核功能。

# 六、总结

六轴 IMU 芯片同时包含加速度、角速度、温度和数字通信功能，其性能验证需要多类激励设备配合。六面姿态解决约±1 g 范围内的零偏与比例因子测试，单轴转台提供稳态角速度，精密离心机提供高 g 加速度，直线振动和角振动系统用于动态响应，温控转台与高低温箱负责不同形式的温度试验。只有将外部参考量与 IMU 原始输出同步记录，才能把器件性能、安装误差和台架状态区分开来。

度纬科技可依据被测 IMU 的封装、量程、接口和测试目标，配置台架、夹具、测试板、同步采集和自动化软件。更换器件时，调整测试板、夹具和软件配置即可复用原有台架及数据链路，适用于研发验证、样品对比和测试方法固化。如需进一步了解，欢迎联系度纬科技，010-64327909。