无人机 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试解决方案

面向飞行控制的姿态、温漂、振动与数据时序测试

全套 DAQ 解决方案，尽在度纬科技

度纬科技 Application Notes-090-V1.0

https://www.doewe.com

一、方案概述

本方案面向采用 MEMS（微机电系统）技术的六轴 IMU 芯片。无人机通过惯性测量单元（Inertial Measurement Unit，简称 IMU）获取三轴加速度和三轴角速度，为姿态估计、飞行控制与云台稳定提供基础数据。旋翼转动带来的振动、起降与机动过程中的运动输入，以及机体内温度的变化，都会影响测量结果。器件选型与验证既要关注静态精度，也要检查实际配置下的噪声、滤波响应和数据更新时序，使后续飞控算法能够使用稳定且时间关系明确的输入。



图 1 无人机示意图

无人机 IMU 测试通常从零偏、比例因子、非线性、量程和横轴响应入手，再结合使用条件检查温度漂移、静态噪声、振动下的输出变化及幅频和相频响应。供电、SPI/I²C 通信、自检、数据就绪中断和 FIFO 同样需要检查。低通滤波可以降低输出噪声，同时会改变信号带宽和相位；测试时将量程、输出数据速率与滤波档位组合记录，便于比较不同配置。

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 1g 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。

针对上述需求，度纬科技将激励与环境台架、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无人机 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试平台。各台架分别提供姿态、角速率、加速度、温度或振动输入，被测芯片通过统一载盘在台架间切换；共用测控部分完成设备联动、数据对应和结果管理。测试配置可从基础静态与温度测项起步，按量程和动态验证需要增加离心与振动设备。

六面姿态测试利用重力，为 X、Y、Z 轴依次提供约±1g 的静态输入；单轴转台提供正、反向稳态角速度；精密离心机用于大于 1g 的多点加速度；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。各测项按器件规格及目标飞行工况选择，量程、温度点、频率范围和判定限值随任务保存。文中应用场景、设备外观和界面数据用于方案示意。

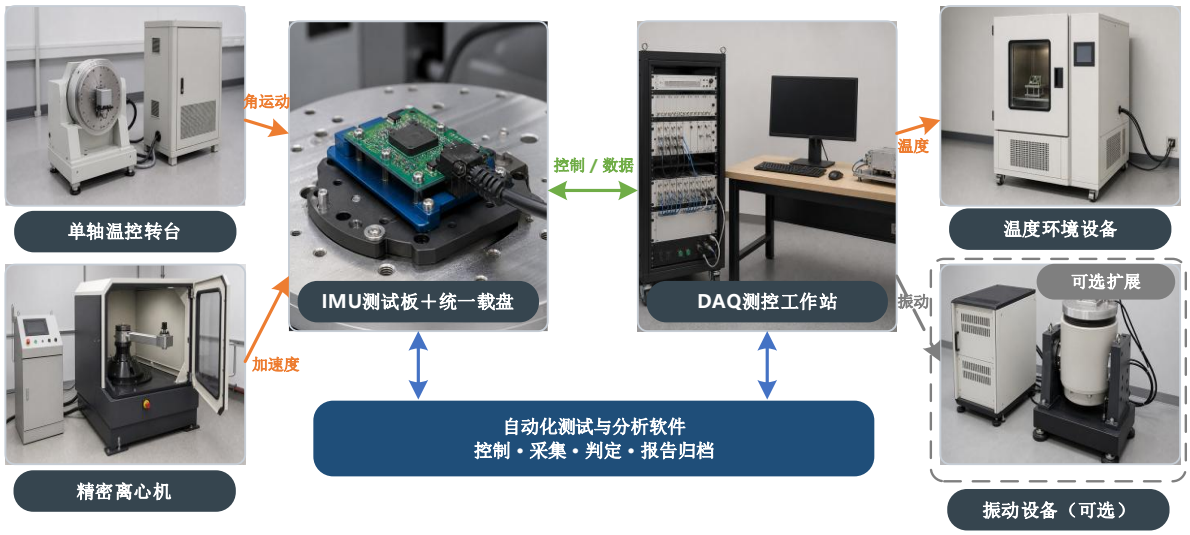


图 2 无人机 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试系统示意图

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、封装、测试板版本和敏感轴方向，选择与飞控配置对应的供电、量程、输出数据速率及滤波档位，再设置姿态、角速率、温度或振动测项。用于机型选型的任务还可关联目标安装位置及已有振动测量记录。软件生成执行序列，并列出所需台架、夹具与参考传感器。

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。

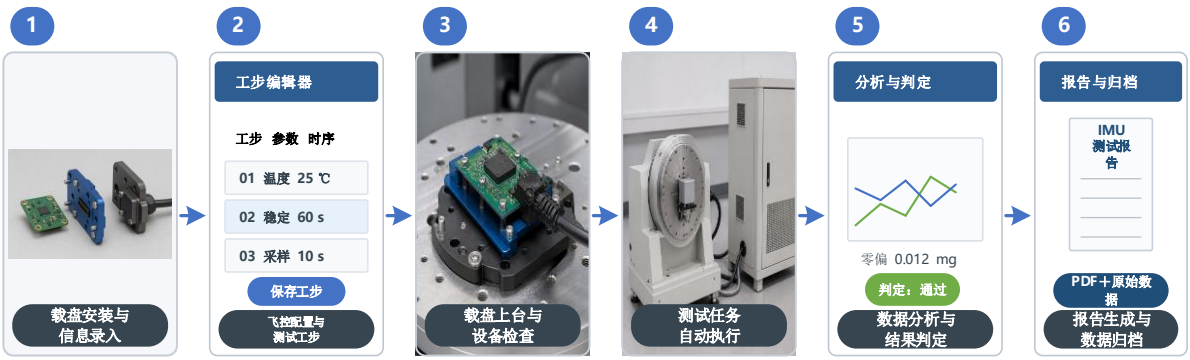


图 3 无人机 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试流程

表 1 列出了 MEMS 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 无人机 MEMS 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
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

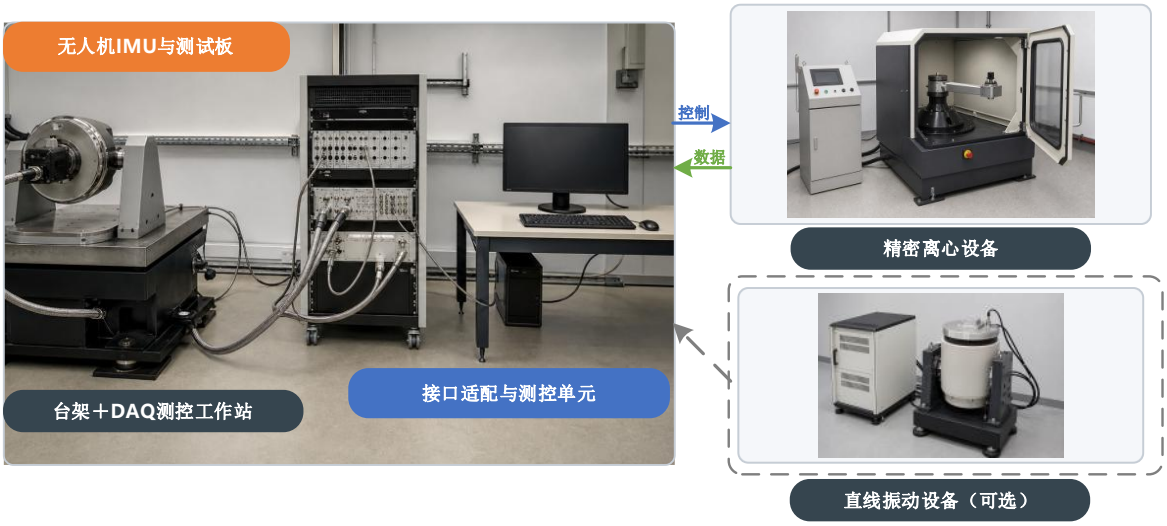


图 4 无人机 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试系统结构

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。

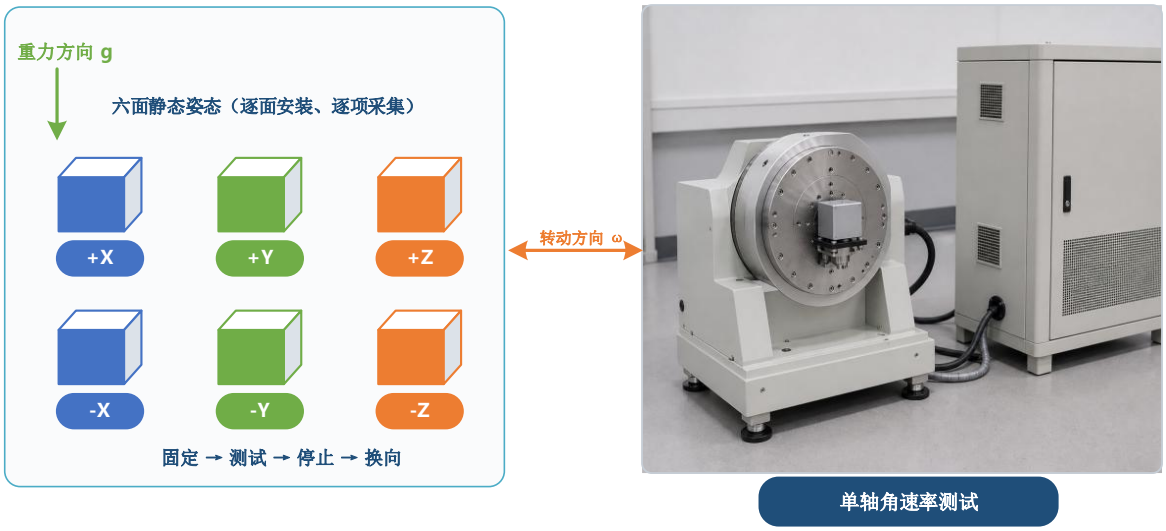


图 5 六面姿态与单轴角速率测试方法

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，数据可根据台架结构通过滑环实时传输或在旋转端缓存。器件振动测试使用刚性夹具，并控制测试板、载盘和线缆的质量与刚度，检查目标频段内的结构共振。飞控板的减振安装可作为后续板级对比项目，分别保存刚性安装和目标安装方式的结果。测试板版本、夹具方向与安装状态随记录保留，便于分析器件输出与安装结构各自的影响。

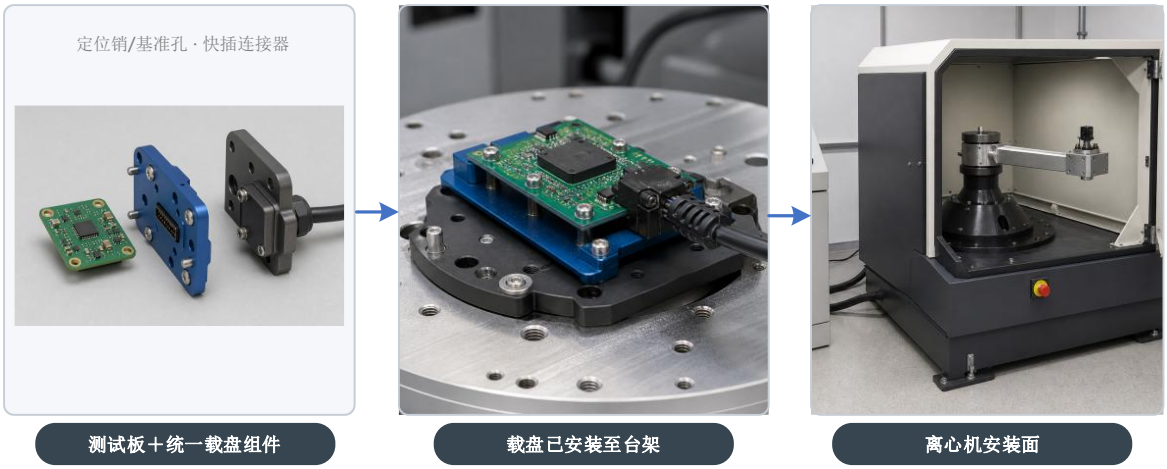


图 6 IMU 测试板与统一载盘跨台架切换示意图

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数据对应关系。稳态测量在台架稳定后取样；扫频与连续运动测试保留参考波形和 IMU 原始序列，按经验证的时间基准对齐。噪声和频响分析使用保留的原始序列，并记录采样率、滤波和坐标变换配置。数据就绪时刻、接口读出时刻与主机接收时刻分别记录，有助于区分器件更新、通信调度和处理延迟。

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。

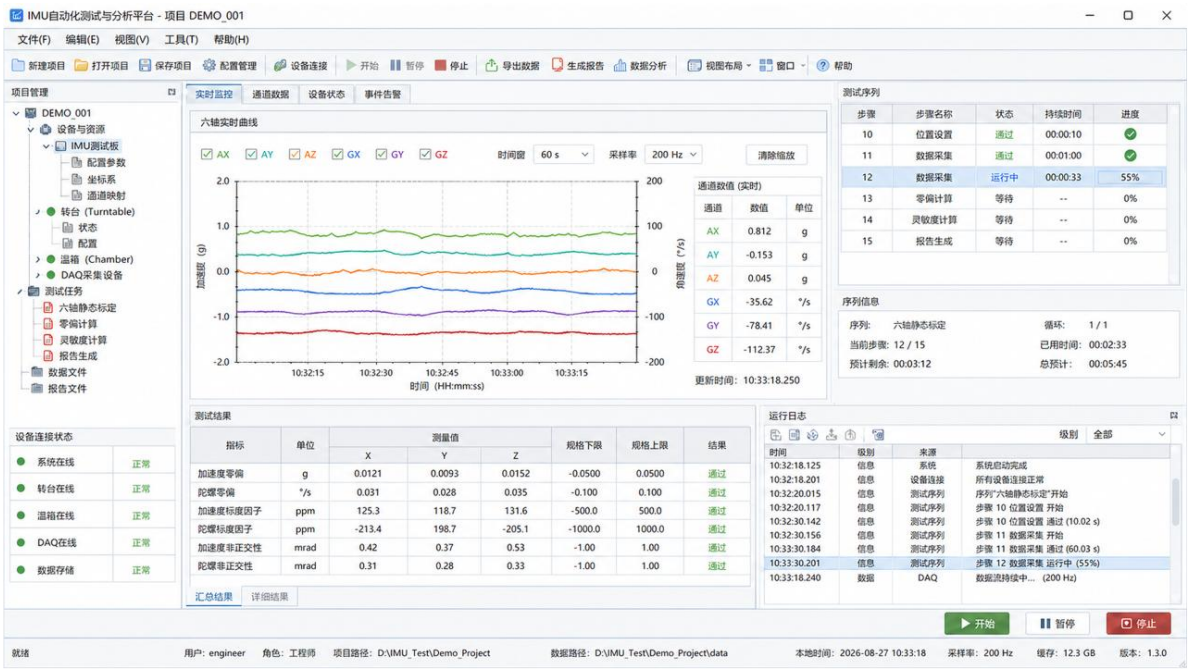


图 7 MEMSIMU 自动化测试与分析软件界面示意图

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+1g 或-1g 输入，另外两轴的理论输入接近 0g。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±1g 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 8 精密离心与温度测试方法示意图

温度测试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采集。陀螺仪在静止状态下记录零速输出与噪声；加速度计通过各温度点的多姿态数据计算零 g 偏置和比例因子。针对上电预热及机体内温度变化，可增加固定姿态下的连续记录，将输出、片内温度码、外部参考温度和电流同时保存，观察从启动到热稳定的变化过程。

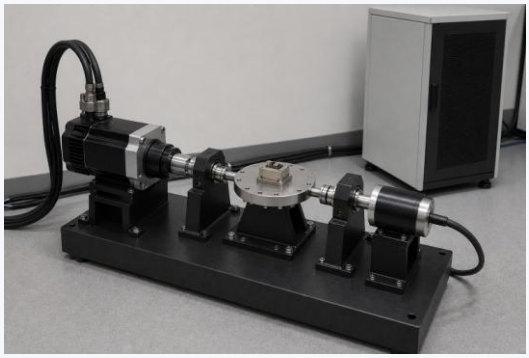
4.3 直线振动与角振动测试

直线振动测试以目标机型已有的振动测量或确认后的频段为依据，检查加速度计的动态灵敏度、幅频和相频响应、滤波带宽及横轴响应。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，先低幅扫频检查夹具，再执行定频或扫频序列。对旋翼相关频段，可比较不同量程、输出数据速率和滤波档位下的原始波形、噪声谱与饱和记录；陀螺仪的振动敏感性另行分析。

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。



直线振动与旋翼频段



角振动与滤波响应

图 9 直线振动与角振动动态响应测试示意图

动态测试中，参考采样率和器件输出数据速率须覆盖目标频段，并留出抗混叠余量；滤波档位与其允许的数据速率配套设置。软件分别给出幅值和相位曲线，按约定方法确定带宽，并比较滤波对噪声与延迟的影响。旋翼振动谱、随机振动或冲击耐久可按项目需要扩展，芯片动态特性结果与整机安装、飞控参数及飞行验证记录分别管理。

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

度纬科技无人机 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试方案将静态、温度与动态测试接入同一套供电、采集、同步和软件系统。各台架保持独立校准，被测芯片通过统一载盘切换，同一组器件配置可以在不同测项间沿用。这样便于比较零偏与温漂，也便于分析振动、滤波设置和数据时序对输出的影响。方案特点如下：

- 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。

- 直线振动与角振动分别评价加速度计和陀螺仪的动态响应，可结合旋翼相关频段比较量程与滤波配置；精密离心机按高 g 验证需求选配。
- 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

无人机 IMU 选型需要同时了解静态误差、温度变化、振动下的输出和数据时序。六面姿态与转台建立静态和稳态输入依据，温度试验观察工作条件变化，振动试验比较动态响应与滤波效果。将这些测试与原始数据、安装方向和器件配置一并保存，可为芯片选型、飞控板调试和后续系统验证提供可复核的测量依据。

度纬科技可依据无人机 IMU 的封装、量程、接口和验证目标，配置激励台架、夹具、测试板、同步采集与自动化软件，并结合已有机型数据确定测试频段和结果输出方式。如有无人机惯性器件选型、性能验证或自动化测试平台建设需求，欢迎联系度纬科技 010-64327909。