机器人 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试解决方案

面向姿态反馈的六轴性能、温度与运动响应测试

全套 DAQ 解决方案，尽在度纬科技

度纬科技 Application Notes-088-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。机器人通过惯性测量单元（Inertial Measurement Unit，简称 IMU）获取三轴加速度和三轴角速度，用于机身姿态、平衡状态及运动变化的估计。移动机器人、足式机器人和带惯性反馈的机械臂，对量程、带宽和安装方向的要求并不相同。电机与传动机构的振动、机身运动以及工作温度变化，都会反映到 IMU 输出中。器件测试需要把这些输入与输出逐项对应，为传感器选型、姿态融合和控制参数调试提供依据。



图 1 家政机器人工作示意图

机器人 IMU 测试首先确认零偏、比例因子、非线性、量程和轴向对应关系，再结合目标机构检查温度漂移、噪声和动态响应。平衡与快速运动应用还需要关注相位和数据延迟；低速运动与停稳判断则更关注零速输出、微小变化和重复性。供电、SPI/I²C 读写、自检、数据就绪中断及 FIFO 按照实际器件配置检查，各测项与其量程、输出数据速率和滤波设置一起保存。

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。

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机器人 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试平台。各台架独立提供相应物理输入，测试板与统一载盘完成器件连接和跨台架安装。软件统一编排测项、关联参考量与被测数据，并保留器件坐标和机器人安装坐标的对应关系，便于后续板级与整机验证沿用。

六面姿态测试为三个敏感轴依次提供约±1g 的静态输入，单轴转台提供正、反向稳态角速度；高量程加速度验证可配置精密离心机，运动带宽与滤波验证可配置直线振动台和角振动台。设备组合按机器人类型、IMU 规格及测试目标确定，温度点、频率范围和判定限值随任务记录。文中应用场景、设备外观和界面数据用于方案示意。

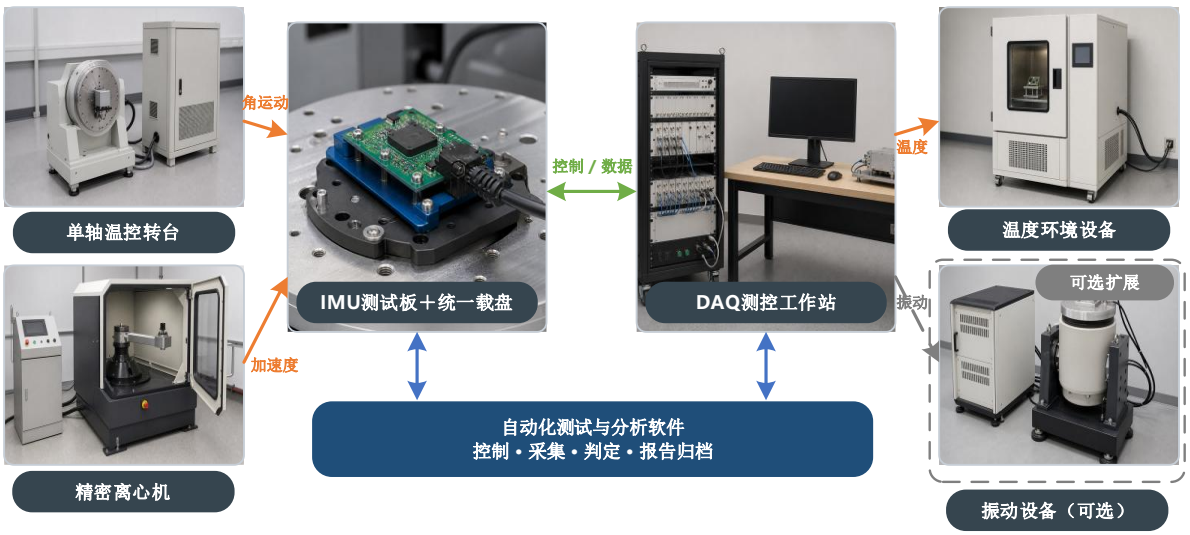


图 2 机器人 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试系统示意图

二、整体测试流程

操作人员在软件中录入样品编号、器件封装、测试板版本、敏感轴方向和目标安装位置，再选择供电、量程、输出数据速率、滤波及机械激励参数。姿态与平衡任务可侧重低速、零偏和动态相位，快速运动任务则结合机构运动范围设置速率与加速度点。软件按任务列出所需台架、夹具和参考传感器，并保存所采用的坐标变换关系。

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。

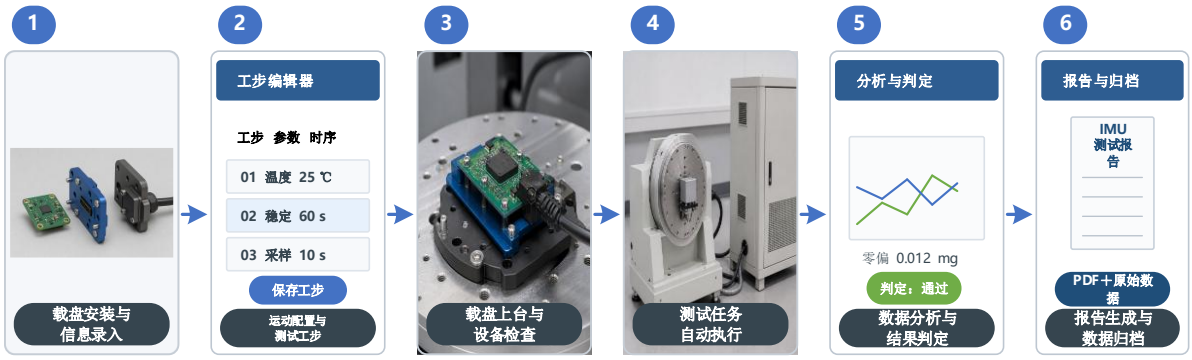


图 3 机器人 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试流程

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 机器人 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

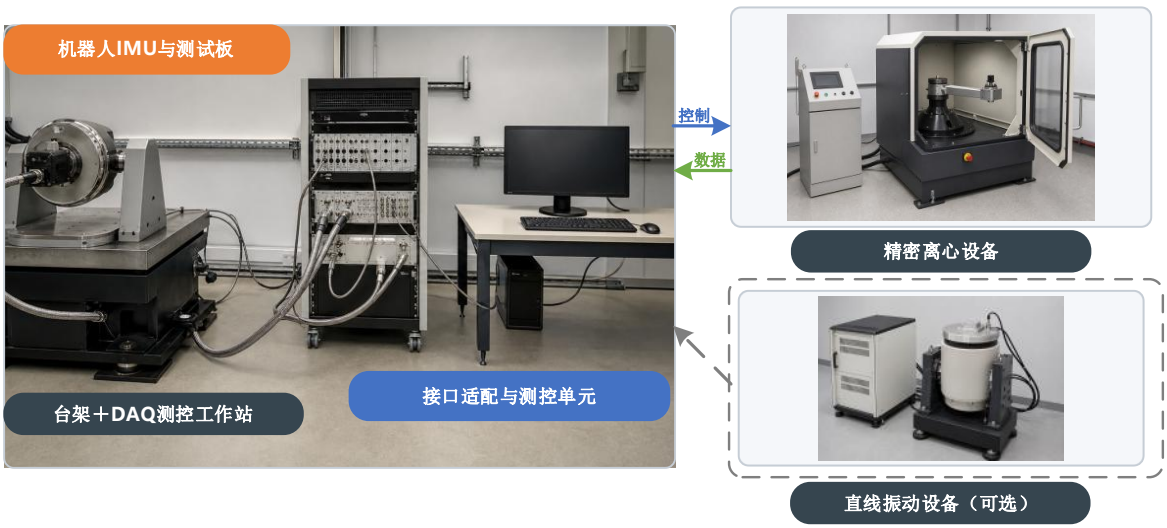


图 4 机器人 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试系统结构

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 1g 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。

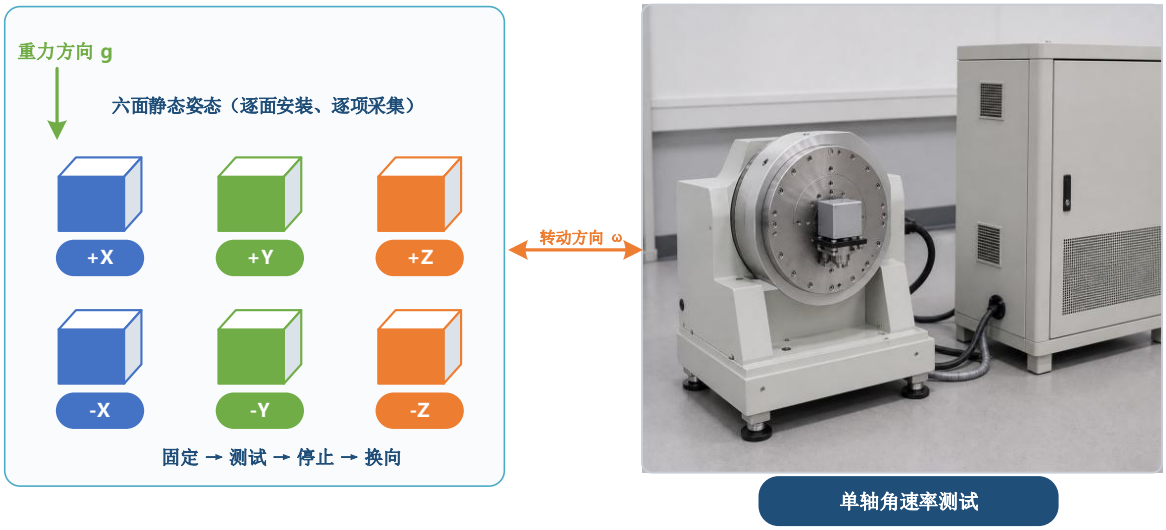


图 5 六面姿态与单轴角速率测试方法

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，可按台架结构采用滑环传输或旋转端缓存。振动工况下控制测试板、载盘及线缆的质量与刚度，先检查夹具自身的共振。机器人机身或关节安装结构可作为后续对比夹具，分别记录器件敏感轴、安装面和机构坐标的对应关系。这样可以将芯片响应与安装位置、连接刚度及传动振动的影响对应分析。

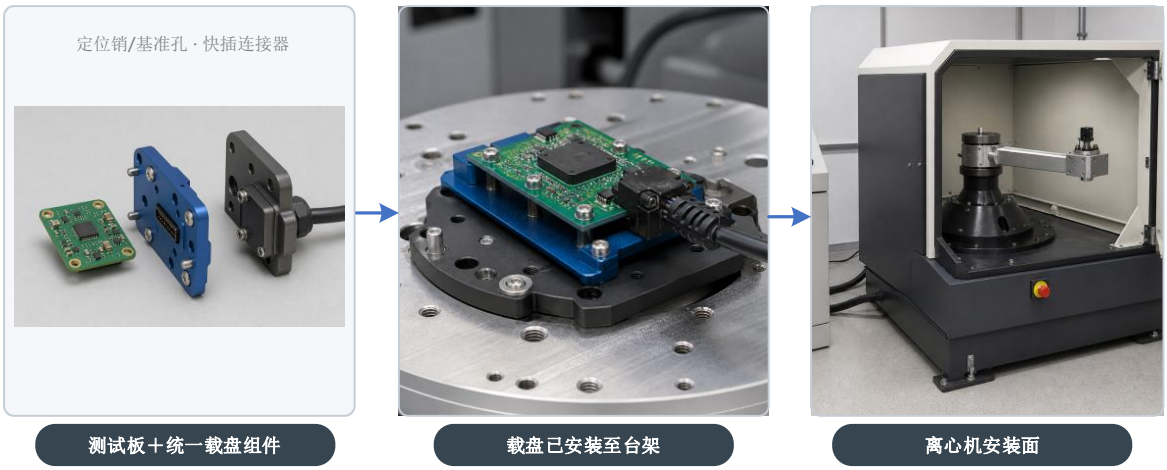


图 6 IMU 测试板与统一载盘跨台架切换示意图

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。

共同触发、硬件时间戳或测试点编号用于建立数据对应关系。稳态测试在台架稳定后采样；连续运动与扫频测试保留参考波形和 IMU 原始序列，并按经验证的时间基准对齐。需要与关节编码器或其他传感器联合分析时，另行记录其采样时间与坐标定义。器件数据就绪、接口读取和主机接收时刻分别保存，便于检查控制链路中的数据更新与调度延迟。

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。

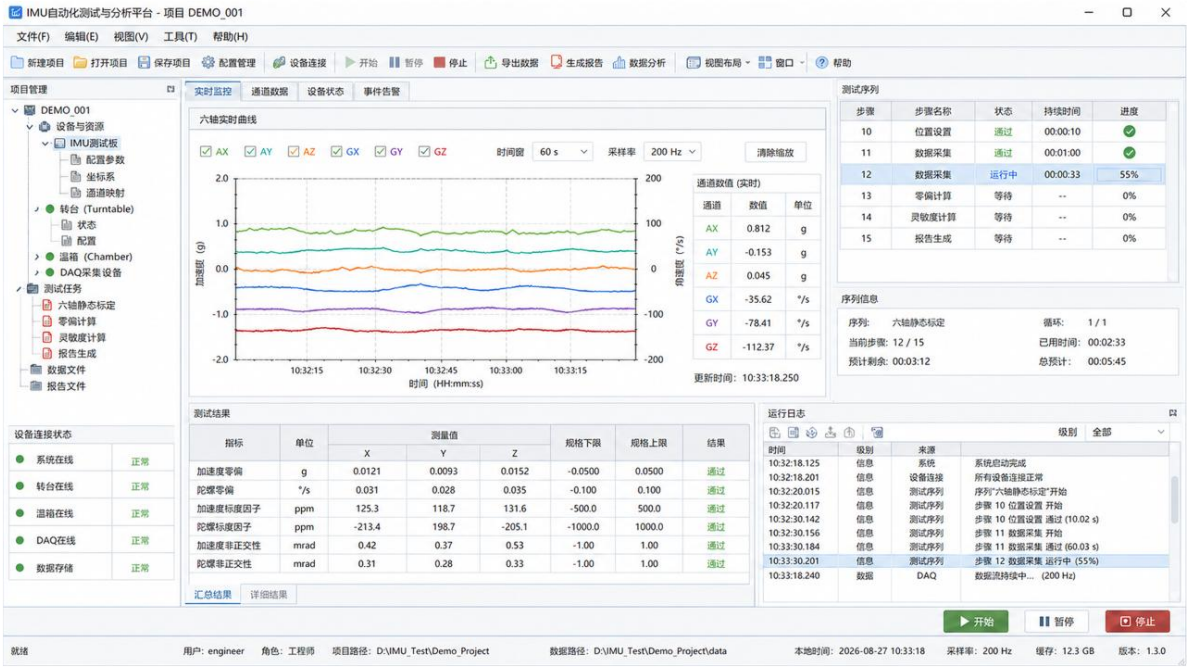


图 7 MEMSIMU 自动化测试与分析软件界面示意图

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，设置零点、正反向中间点及量程内的高值点。面向低速转向或平衡应用时，可在目标工作区间增加低速点，并核对转台在该区间的实际参考能力。每点稳定

后记录编码器角速度和器件输出，计算比例因子、非线性及正反向一致性。一个轴完成后停台换面，再测试其余两轴，并复测零速输出。

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

参考温度传感器布置在芯片附近，各温度点稳定后记录零速输出、噪声与工作电流，并通过多姿态数据计算加速度计零 g 偏置和比例因子。针对机器人连续工作后的温升，可增加固定姿态下的上电预热与温度变化记录，同时保存片内温度码和外部参考温度。多次温度循环采用一致的安装与采样条件，便于比较温漂和重复性。

4.3 直线振动与角振动测试

直线振动测试结合机身、电机和传动机构已有的振动测量，或项目确认的频段开展。参考加速度传感器与 IMU 靠近安装在刚性夹具上，先低幅扫频检查夹具，再测试动态灵敏度、幅频和相频响应、滤波带宽及横轴响应。对工作频段内的明显峰值，保留原始波形并比较不同滤波配置；涉及整机结构共振时，结合安装位置和参考测量另行分析。

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。



图 9 直线振动与角振动动态响应测试示意图

动态测试按目标机构的运动频段配置参考采样率、器件输出数据速率和滤波档位，并留出抗混叠余量。软件分别给出幅值与相位曲线，比较滤波配置对噪声、有效带宽和延迟的影响。直线与角振动用于芯片动态特性评价，步态、碰撞或长时间结构耐久可依据具体机器人及项目要求扩展，相关试验条件分别归档。

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

度纬科技机器人 MEMS 六轴 IMU 芯片自动化测试方案将静态、温度与动态测项接入统一的供电、采集和软件系统。独立台架分别提供可核查的参考输入，统一载盘减少换型和跨台架连接工作，坐标映射与器件配置随结果保存，便于从芯片评价延续到机器人安装条件下的对比验证。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。
- 直线与角振动分别评价加速度计和陀螺仪的带宽、相位及横轴响应，可结合电机和传动频段比较滤波配置；精密离心机按高 g 量程验证需要选配。
- 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

机器人 IMU 测试需要把器件误差与目标机构的运动、温度和安装条件联系起来。六面与角速率测试确认基础性能，温度试验观察连续工作中的变化，振动与时序测试为带宽和滤波配置提供依据。保存参考输入、六轴原始数据、坐标关系和器件配置，有助于在传感器选型、控制调试与异常分析中使用同一套可复核的结果。

度纬科技可结合移动、足式或机械臂等机器人的 IMU 应用需求，提供台架配置、专用夹具、测试板、同步采集和自动化软件方案，并按器件规格和机构运动特点确定测项。如有机器人惯性器件验证、样品对比或自动化测试平台建设需求，欢迎联系度纬科技，010-64327909。