无人机 MEMS 压力传感器芯片自动化测试解决方案

面向气压测高与差压空速的压力、温度和动态响应测试

全套 DAQ 解决方案，尽在度纬科技

度纬科技 Application Notes-091-V1.0

https://www.doewe.com

一、方案概述

本方案面向采用 MEMS（微机电系统）技术的压力传感器芯片及其封装器件。无人机利用气压传感器测量环境绝对压力，为高度估计与垂直运动控制提供输入；需要空速测量的固定翼等平台，还可通过皮托管和差压传感器获取与气流速度相关的压差信息。两类器件的压力范围、参考方式和气路连接不同，测试配置也需要分别建立。芯片输出的偏差、噪声、温度变化及更新速度，会影响后续高度或空速计算，因此器件选型需要建立完整的压力性能记录。



图 1 无人机示意图

飞行过程中的环境压力和温度会变化，飞控板上电后的温升、气流扰动以及通气结构也会影响压力读数。芯片测试先在受控压力、温度和供电条件下评价误差、噪声与漂移，再根据应用需要检查小幅压力变化、阶跃响应和数据更新时序。机体通气孔、防护材料、导压管和安装位置的影响，可在板级或装配状态下另设对比试验，与芯片本体结果关联保存。

度纬科技将气压控制、独立参考测量、温度环境、专用密封夹具、供电采集和测试软件组成无人机 MEMS 压力传感器芯片自动化测试系统。绝压任务配置覆盖目标大气压力范围的控制与参考通道，差压任

务配置相匹配的小差压控制及参考通道。软件统一执行压力与温度序列，保存实测输入、器件输出和配置，多个工位可共用已确认一致的试验条件。

测试对象包括安装在测试板上的通气式绝压芯片，以及带高、低压力口的差压封装器件。绝压芯片通过小型压力腔或匹配封装的密封夹具接受输入，电气连接经密封引出；差压器件分别连接两个压力端口。系统可执行多点升降压、温度特性、稳压噪声与漂移、供电和接口测试，并按需要扩展小幅压力变化及动态响应测项。

系统采用与器件兼容的洁净气体，低于环境压力的绝压点由真空支路建立，差压支路按目标压差及共模压力单独选型。压力范围、温度点、变化速率、滤波与判定限值依据器件规格及使用需求确定。用于高度或空速计算时，同时记录换算模型和参考条件。文中应用场景、设备外观及界面数据用于方案示意。

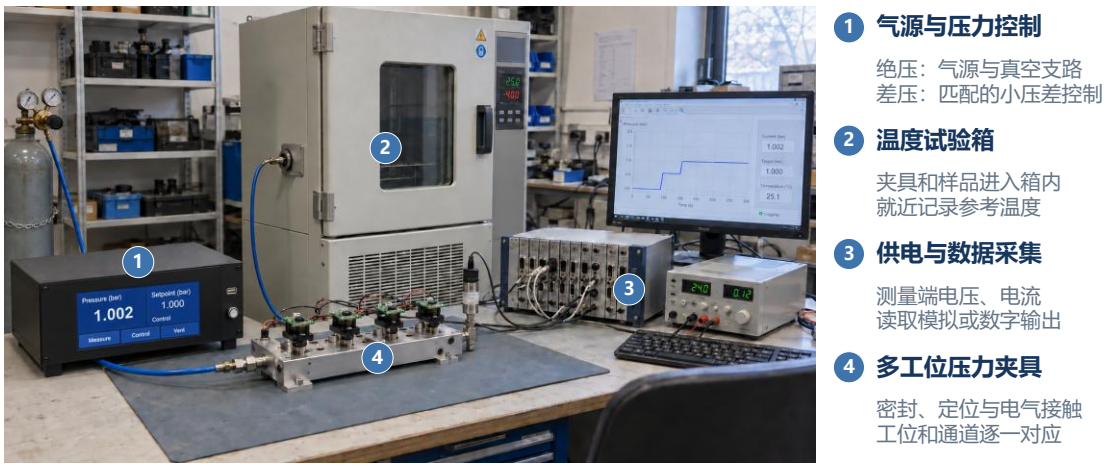


图 2 无人机 MEMS 压力传感器芯片自动化测试系统示意图

二、整体测试流程

建立任务时，操作人员先选择绝压测高器件或差压空速器件，录入样品编号、量程、接口和夹具位置。软件分别加载绝压范围或差压与共模压力配置，再设置温度点、采样窗口、输出数据速率、过采样及滤波参数，并核对本次使用的压力支路和参考标准。

样品装入夹具后，先核对压力口、工位编号与电气通道的对应关系。密封面和接头保持清洁，压紧力按夹具设计控制。多工位共用歧管时，各支路分别检查密封状态，确认各工位可以在规定压力条件下开展测试。

启动序列依次检查供压条件、阀门、参考测量、温箱和泄压通路，再以规定的检查压力进行密封检查。确认状态正常后，为器件上电并记录工作电流、通信状态及首个有效输出，完成规定预热后进入正式测试。

静态测试从规定的零点或下限点开始，逐点升压至上限，再按相同点位降压。每到一个点，软件依据参考压力的波动、变化趋势和规定等待时间判断采样条件；温度试验同时检查器件附近的参考温度。压力与温度均达到稳定要求后进入采样窗口，设备到位状态作为辅助记录保存。稳压时间超过设定上限时，软件记录原因并提示复核相应点位。

温度试验在各目标温度下重复升降压序列；稳压漂移试验则在固定压力和温度下连续记录。设备设定值、实际参考量、器件输出及运行状态随测试点一并保存。静态测试按点位和采样窗口对应，动态测试按共同触发或经验证的时间基准对齐。

计算前先检查参考量、采样记录和报文完整性。环境或通信异常的数据保留原因标记，有效数据用于特性计算；复测另存并关联首次结果。绝压任务结束后，缓慢恢复至环境压力；差压任务先使两端压差回到允许范围，再按夹具要求恢复压力。确认允许拆卸后取下样品，并保存压力恢复过程。



图 3 无人机 MEMS 压力传感器芯片自动化测试流程

表 1 列出了常用测项。压力点、温度点、循环次数、保持时间和判定限值按器件资料与试验目的配置，测量方法随任务保存。

表 1 无人机 MEMS 压力传感器芯片常见测项

测项	测试方法	主要结果
供电与启动	规定电压和模式下上电，记录电流与首次有效输出	工作电流、启动与恢复时间
多点升降压	绝压或差压范围内逐点加载，在工作区间增加点位	下限点误差、灵敏度、非线性
迟滞与重复性	比较正反程及多个完整循环的对应点	迟滞、循环间离散性
温度特性	各温度点重复规定压力序列	工作点误差、零差压偏移、灵敏度变化
稳压噪声与漂移	固定压力与温度，连续记录参考量和输出	短时噪声、相对参考量的漂移
密封检查	规定检查压力下隔离支路，观察压力与温度	支路压降、装夹或密封异常
响应时间	快速压力激励，同步采集参考与器件波形	延迟、上升与下降时间

测项	测试方法	主要结果
过压恢复与循环	按规范加载，恢复后复测基准点	零点、灵敏度及密封状态变化
输出与接口	按实际接口检查负载、报文与异常恢复	输出范围、更新周期、诊断状态

三、测试系统组成

压力与温度设备建立试验条件，测试板和采集单元完成器件连接与电气测量，上位机软件协调各部分运行。图 4 分别给出了压力通路、电气采集通路和设备控制关系。软件通过测试点编号和采样时间，将实际参考压力、器件输出及环境记录对应起来，用于后续特性计算和结果复核。



图 4 压力通路、电气采集与设备控制关系

3.1 压力发生、控制与参考测量

绝压控制回路通过洁净气源和真空支路覆盖目标压力区间，控制器按设定值升压、降压和稳压。气路使用适配的过滤、干燥及污染隔离措施，控制器和阀组按最低绝对压力、稳定度与容积选型。小差压测试采用专用控制单元，核对其分辨能力、零点稳定性及两端允许压力，避免用宽量程配置承担细小压差的评价。

本方案采用独立参考压力标准记录器件实际输入。参考仪表与被测器件连接在同一段已确认均压的管路上，使两者测得的压力可以直接对应。选型时根据被测量程和目标误差核对参考仪表的校准范围与测量不确定度。采用控制器内置测量通道作为参考时，其测量准确度按校准结果及不确定度单独评价，控制稳定度则用于评价稳压过程。

阀组与歧管负责分配、隔离和恢复压力。多工位静态测试先确认各支路密封和均压时间，再采用共同的稳定条件取样。小幅变化与动态测试控制管路、接头和压力腔的内部容积，参考测点靠近被测位置。差压两侧管路的长度、容积及响应差异一并记录，更换夹具、通气结构或管路后重新核查传递特性。

绝压器件以绝对压力作为输入，采用同定义的参考标准，在器件规定工作范围内设置试验点；量程下限不必等于真空零点。差压器件由高、低压端共同确定输入，ΔP = PH - PL；空速应用可在目标环境绝对压力下施加规定压差。测试前核对压力端口极性、允许负差压和共模压力，分别保存两端压力条件与差压参考值。

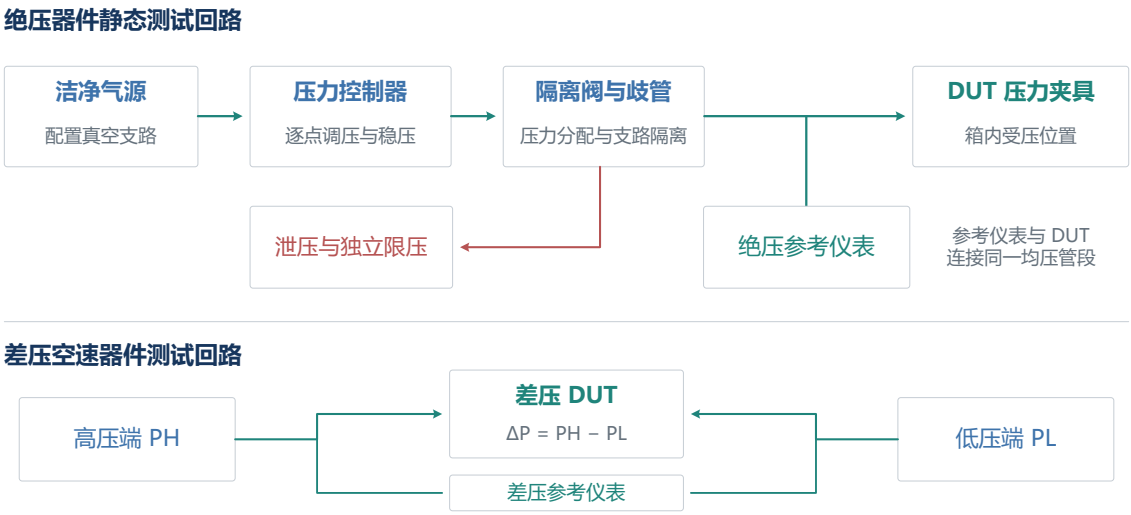


图 5 绝压测高与差压空速器件测试气路

3.2 测试板、封装夹具与气路连接

测试板将器件引脚引出至供电和采集接口，配置去耦、保护、负载及必要的信号调理，并保留电源与信号测试点。更换封装时，主要调整插座、测试板和压力转接块；载盘连接、电气通道编号及软件任务框架可以继续使用。

夹具按封装通气位置设计压力腔与密封边界，保留器件规定的进气通道，压紧力由定位与限位结构控制。各工位独立编号，压力支路、测试板和采集通道在软件中对应管理。密封检查先评价夹具和连接处的压力保持能力；器件通气膜或防护结构的压力传递特性在对应装配状态下另行测试，避免与外部泄漏混为一项结果。

温度试验时，夹具、测试板、线缆与压力管路进入温箱，控制器和参考仪表通常位于箱外。芯片附近布置参考温度测点，记录温箱稳定后的器件周围温度；需要分析上电自热时，同时保留片内温度码和电流。差压回路核查两侧压力传递及温差影响，待温度和参考压力均满足稳定条件后采样。

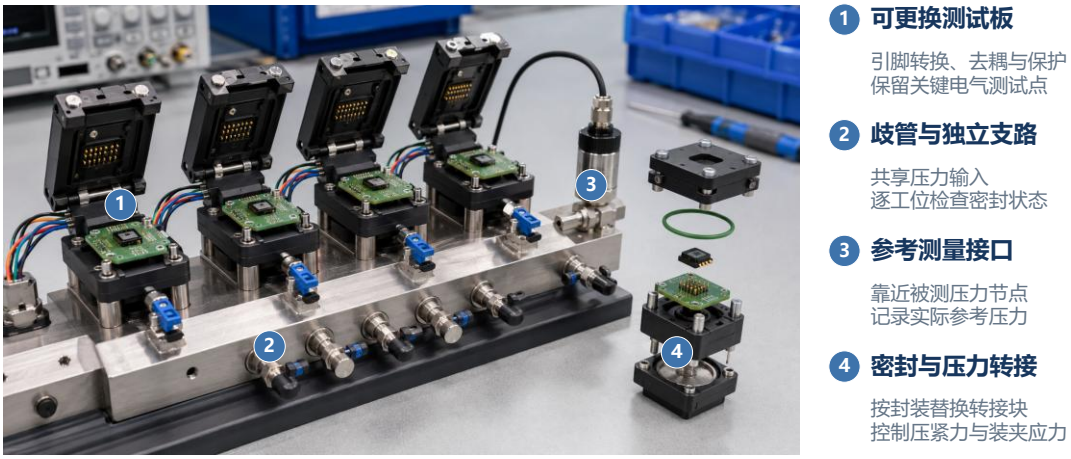


图 6 多工位压力夹具与器件连接示意图

3.3 供电、采集与数字接口

可编程电源提供工作电压，采集单元同时测量器件端电压、电流和输出。比例式电压输出按器件规定用输出与激励之比评价；毫伏级电桥采用低噪声激励和差分测量；电流输出配置匹配的采样电阻或电流通道。多工位可分组供电，并隔离短路或异常电流支路。

采集方式随测项选择。稳态测试在规定窗口内统计平均值与离散性，响应测试保留完整波形。参考压力、温度和被测输出分别保存原始序列及时间信息，采样率、量程与滤波配置随任务记录。数字输出由接口单元就近接收，再与外部参考数据建立对应关系。

数字接口以被测芯片实际采用的 I²C 或 SPI 等协议配置。I²C 核对逻辑电平、上拉及总线时序，SPI 核对时钟、片选和采样边沿；数据就绪或片内时间信息用于识别样本更新时间。软件按器件要求执行压力与温度补偿换算，并保存原始码、系数版本和配置。模拟差压器件则使用匹配的电压或电桥采集通道。

3.4 自动化测试与分析软件

软件提供单点调试与自动运行两种方式。操作界面区分绝压和差压任务，显示压力定义、实测参考量、温度及数据更新状态。自动序列完成密封检查、预热、压力与温度切换、稳定判断和采样；小幅变化、噪声与动态测项保存连续原始序列。运行日志保留设备响应和异常原因，便于定位到工位、点位和器件配置。

每个结果都关联样品编号、工位、测试板版本、器件配置、参考仪表与校准信息。计算方法和限值独立保存版本，超限时可直接回看原始波形及运行日志。压力、温度或电流异常会中止当前序列，并按装置预设策略隔离、泄压或断电；机械限压和硬件联锁独立于软件保留。报告按项目模板导出，条码、数据库或制造执行系统对接可按需增加。



图 7 MEMS 压力传感器自动化测试与分析软件界面示意图

四、典型测试方法

4.1 多点升降压、迟滞与重复性测试

在规定温度与供电下，从器件允许的量程下限逐点升压，再按相同点位降压。除覆盖量程外，气压测高器件可在目标工作压力附近增加密集点；差压器件可在零差压附近增加正、负小差压点，负向加载以器件允许条件为准。每点同步记录参考压力和输出，保留平均值、标准差及样本数，并通过完整循环比较迟滞与重复性。

输出尚未换算为压力时，灵敏度可取两端输出差与参考压力差之比，或采用规定的多点拟合方法。以近似线性输出为例，S = (YH - YL)/(PH - PL)，各量来自同一温度、加载方向和循环。已输出压力值的数字器件直接评价压力误差。绝压器件记录规定下限点输出，差压器件另记录零差压输出，数据名称与压力定义保持一致。

非线性按所选参考直线计算最大偏差，并注明端点法、最佳拟合直线或器件规定方法。迟滞比较升压和降压过程在同一实际压力下的输出差，重复性比较各次循环在相同方向、相同实际压力下的输出。当正反程的实测压力略有差异时，软件在两组数据共同覆盖的压力区间内，利用相邻实测点按既定插值方法分别求出同一压力下的输出，再进行比较。插值方法和使用的数据点随结果保存。

压力输出的单点误差为 Ei = PDUT,i - Pref,i，可按规定压力跨度归一化，并保留参考、温度和采集链的不确定度评估。气压测高关注目标压力附近的小幅变化与噪声；将压力误差换算为高度误差时，注明参

考气压、温度假设和大气模型。差压换算为空速时记录皮托管关系与空气密度条件，使压力性能和应用换算结果可以分别复核。

4.2 温度特性与稳压漂移测试

各温度点采用相同的压力序列，并固定供电、采样窗口和装夹状态。温箱达到设定值后，继续观察器件附近参考温度，满足温度与压力稳定条件再采样。需要考察温度滞后时，按相同点位分别执行升温和降温过程。

绝压器件比较各温度下量程下限及工作点误差，差压器件同时比较零差压偏移与灵敏度变化。带温度补偿的器件评价最终压力输出，片内温度码作为辅助记录。包含补偿系数计算和写入时，将计算点与独立验证点分开，保存系数版本、点位分组及写入前后数据，再以验证点检查温度下的输出。

稳压试验在固定压力、温度和器件配置下连续采样，分别计算短时间窗口内的输出离散性和较长时间内相对参考压力的变化。改变过采样、输出数据速率或滤波档位时，保持其余条件一致，比较噪声、更新时间与动态响应。记录时长、参考温度、采样设置及参考测量的不确定度随任务保存，用于分析缓慢压力变化、自热和器件漂移。

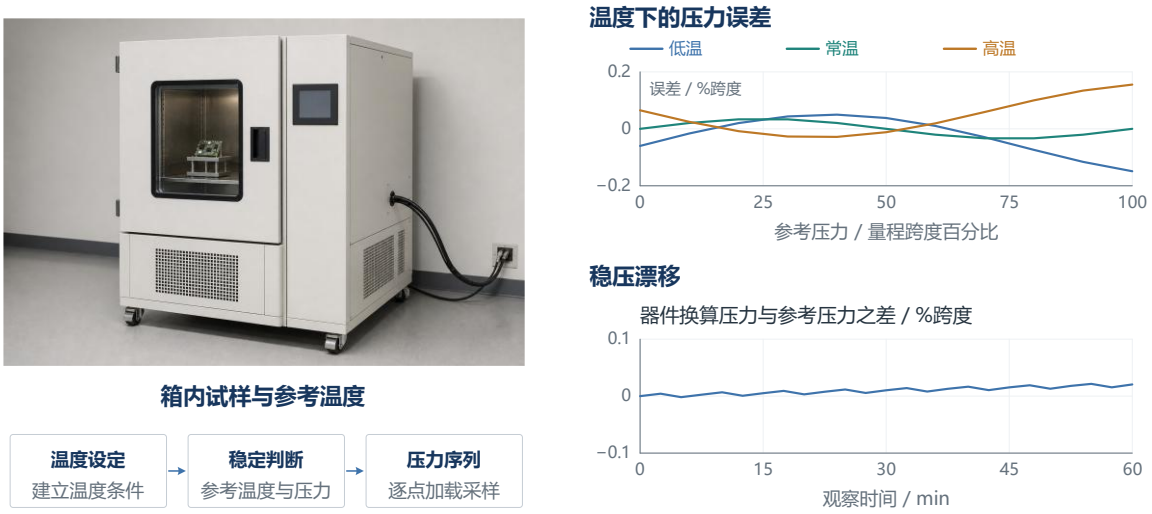


图 8 温度测试布置与典型结果分析示意图

4.3 小幅压力变化、动态响应与压力循环

动态测试按预期响应速度选用快速阀组或专用压力激励装置，参考传感器靠近被测位置，采集通道采用共同触发或经验证的时间基准。气路容积、激励速度和参考带宽共同校核，使输入与参考测量链足以分辨被测响应。绝压器件可增加围绕工作点的缓慢斜坡与小幅阶跃；差压器件在规定共模压力下施加压差变化，并同步保存实际参考波形。

分析时先检查实测压力波形，再按规定阈值计算延迟、上升和下降时间。图 9 以 10%～90%阈值示意上升时间，实际定义采用器件规范。过压恢复试验则按规定压力与保持时间加载，泄压并恢复后复测零点、灵敏度和密封状态。压力循环用于考察反复加载后的性能变化，加载速率与循环次数按验证要求设置。

板级验证可在保持同一压力输入的条件下，对比裸露通气位置与目标防护结构，观察响应时间和压力滞后。压力循环及过压恢复按器件额定能力与项目要求配置，加载后复测误差、噪声和通信状态。破坏性试验如有需求，另配置独立防护设备与专用回路，不与常规气压特性测试共用洁净支路。

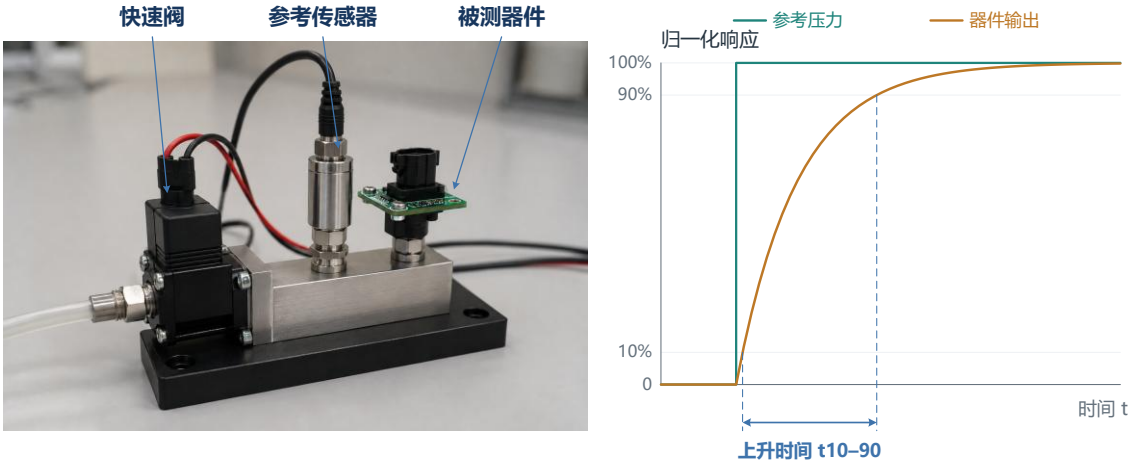


图 9 动态压力测试布置与响应时间定义示意图

4.4 供电、模拟输出与数字接口测试

供电测试在器件规定的电压点和模式下进行，记录端电压、工作电流及首次有效输出。启动、休眠唤醒和模式切换分别保存电流与输出过程。模拟输出按规定负载检查输出范围、比例关系和饱和状态，异常供电后的恢复条件同样由器件资料确定。

数字接口测试检查压力与温度原始码、补偿结果、更新周期和状态标志，并按器件实际提供的功能检查校验与异常恢复。数据就绪、接口读取和主机接收时刻分别记录；使用 FIFO 或分批读取时，样本时间按器件时间信息还原。过采样、滤波及低功耗模式切换后重新核对输出速率和首个有效样本，避免把重复读取当成新数据。

五、方案核心优势

度纬科技将绝压与差压控制、温度环境、电气采集和测试软件统一配置，便于围绕无人机气压测高及差压空速需求建立器件评价流程。方案核心优势体现在以下方面：

- 压力输入与器件输出对应测量。每个测试点同时保存实际参考压力和电气输出，结合温度及供电记录分析误差来源，为特性计算提供完整依据。

- 自动执行压力与温度组合测试。软件统一编排升降压、温度切换、稳定判断和数据采集，减少人工设点与抄录，便于重复执行相同试验条件。
- 多工位共用设备，结果逐通道管理。歧管和温箱为多只器件提供共同试验条件，工位编号与采集通道对应，便于进行批次对比及异常工位复测。
- 夹具与接口适配便于换型。测试板、插座和压力转接块随器件封装及输出形式调整，压力设备、温箱、采集平台和软件框架可在适用范围内复用。
- 测试结果可追溯和复核。原始数据、参考仪表校准信息、算法与限值版本随任务归档，首次测试与复测记录分别保存，支持按点位回看波形、报文和运行日志。
- 测项围绕使用需求扩展。基础压力与温度测试可增加工作点附近的小幅变化、稳压噪声、滤波与更新时间对比，并支持通气结构和导压管的装配状态验证。

六、总结

无人机压力传感器验证需要先明确绝压测高或差压空速的任务，再选择相应的控制与参考回路。多点压力与温度测试给出基础误差，稳压记录和小幅变化反映噪声与分辨表现，动态与接口测试说明压力传递及数据更新过程。将芯片结果与装配状态、换算模型和参考条件关联保存，可为飞控器件选型及后续系统调试提供依据。

度纬科技可结合无人机气压或差压芯片的封装、量程、接口及验证目标，提供压力设备、专用密封夹具、测试板、采集单元与自动化软件方案。如有气压测高、差压空速器件验证或自动化测试系统建设需求，欢迎联系度纬科技 010-64327909，共同确定测试配置与实施方式。