机器人 MEMS 压力传感器芯片自动化测试解决方案

面向气动、真空与液压执行机构的压力和温度测试

全套 DAQ 解决方案，尽在度纬科技

度纬科技 Application Notes-089-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。机器人在气动夹持、真空搬运和液压执行机构中使用压力传感器，为供压调节、吸附状态判断和动作监测提供反馈。柔性气动执行器也可利用压力数据辅助控制形变。不同应用涉及正压、负表压或两端压差，介质、量程及响应要求各不相同。传感器输出的误差、温漂和响应延迟，会影响压力判断与控制过程，因此需要在明确的输入条件下评价器件性能。



图 1 家政机器人工作示意图

机器人动作过程中，阀门切换、气路充排气、负载变化和连续运行温升会共同影响压力读数。器件测试首先建立实际压力与输出的对应关系，再评价迟滞、重复性、稳压漂移及动态响应。用于夹持力或接触力估算时，除压力外还需要结合有效受力面积、摩擦和机构状态进行系统标定；芯片测试以压力测量性能为评价对象，保留后续联合分析所需的原始数据。

度纬科技将压力控制、独立参考测量、温度环境、专用夹具、供电采集和测试软件集成为机器人 MEMS 压力传感器芯片自动化测试系统。气动与真空器件配置对应的气路，液压器件配置与介质兼容的专

用回路；各支路分别建立实际输入，通过统一软件完成点位控制、同步采样、计算与报告归档。多工位可共用已确认一致的压力和温度条件，各通道单独管理器件结果。

测试对象包括带压力口的封装器件，以及安装在测试板上、通过密封夹具施压的芯片。夹具连接器件受压位置，并完成定位和电气连接。系统可执行正压或真空范围内的升降压、温度特性、稳压漂移及供电接口测试；围绕阀控动作与重复抓取，还可配置动态压力、压力循环和过压恢复测项。裸芯片或晶圆级测试按专用压力腔及电气接触方式另行扩展。

配置时先明确压力定义与介质。气动加载采用洁净气源，真空吸附器件配置受控真空支路；液压加载使用与器件接触材料兼容的介质、管路和密封件。采集通道按电压、电流、电桥或数字输出选择，压力范围、温度点、变化速率及判定限值依据器件规格和机器人任务确定。文中应用场景、设备外观及界面数据用于方案示意。

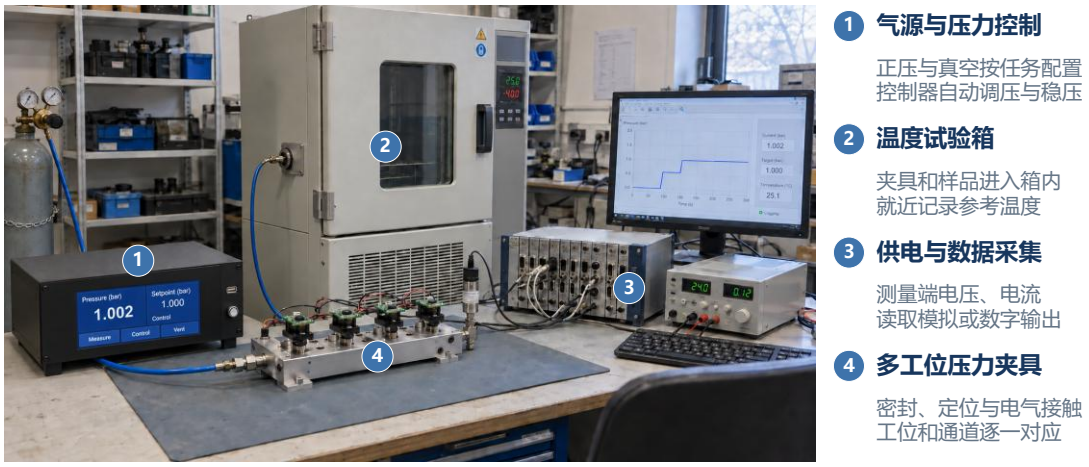


图 2 机器人 MEMS 压力传感器芯片自动化测试系统组成示意图

二、整体测试流程

操作人员建立任务时，录入样品编号、压力类型、介质、量程、接口和工位，选择气动正压、真空或液压支路。软件加载与器件匹配的供电、采样和稳定配置，再设置压力点、温度点、加载方向及循环序列。面向动作响应验证时，另外记录目标压力变化形式、参考带宽和时间对应方式。

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，复测另存并关联首次结果。正压任务结束后受控泄压，真空任务缓慢恢复至环境压力；液压回路按装置要求卸压与收集介质。确认夹具内压力达到允许拆卸状态后再取下样品，首次测试、异常记录和复测结果一并归档。



图 3 机器人 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 机器人 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
正压与真空升降压	按压力定义加载与恢复，稳定后同步采样	零点或下限输出、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	零点温漂、灵敏度温漂、温度下误差
稳压漂移	固定压力与温度，连续记录参考量和输出	相对参考量的变化趋势
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

测项	测试方法	主要结果
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
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。

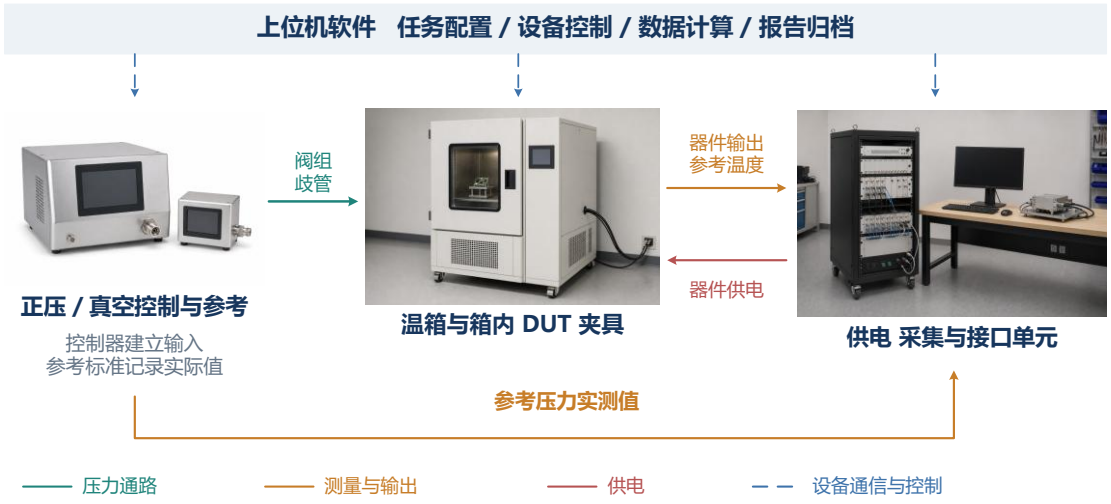


图 4 压力通路、电气采集与设备控制关系

3.1 压力发生、控制与参考测量

气动回路由洁净气源和控制器建立正压，真空支路由真空源及匹配的调节单元完成抽气、回气和稳压。液压回路使用适配介质的压力发生装置，配置排气、清洗和收集结构。设备按目标绝对压力或表压范围、变化速率和管路容积选择；气体、真空与液体支路分别核对额定能力和污染控制条件。

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。

阀组与歧管负责压力分配、支路隔离和卸压。多工位静态测试先确认密封与均压时间；动态测试控制阀门至器件的管路长度、接头和夹具内部容积。真空支路同时观察回气过程，液压支路结合介质密度修正参考端与被测端的高度差。更换阀组、夹具或管路后重新核查实际压力传递与稳定条件。

表压器件以同一环境大气压力为参考，真空工况用负表压或绝对压力表示时，在任务中明确单位与定义。绝压器件采用绝压参考标准；差压器件分别连接高、低压端，并同时核对允许压差和共模压力。需要比较执行机构两腔压力时，可分别采集两端压力或使用适配的差压通道，结果与各测点位置及加载方向一并保存。

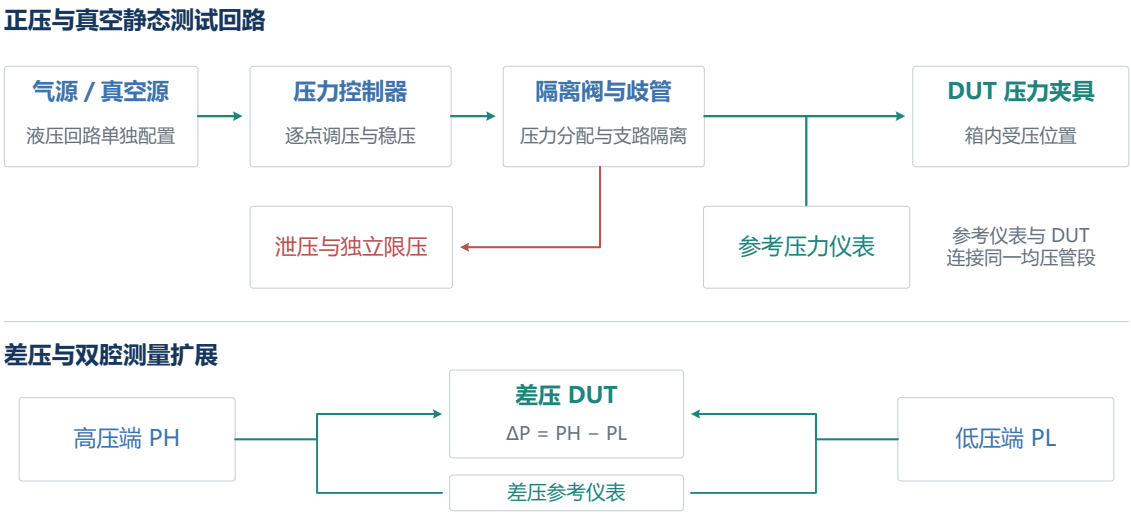


图 5 正压、真空与差压扩展测试回路

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。

夹具将密封、定位和电气接触集中在同一工位，密封材料按气体、油液或其他实际介质选择，并核对压力和温度范围。定位基准与压紧限位保持重复装夹条件，各工位的支路、测试板和采集通道分别编号。密封检查用规定容积内的压力变化筛查连接异常；真空支路观察压力回升，计算泄漏率时结合容积、温度和系统本底变化修正。

温度试验中，夹具、线缆和压力管路随器件进入温箱，控制器及参考仪表通常放在箱外。器件附近布置参考温度测点，用于记录样品周围的实际温度。对表压或差压测试，结合连接方式核查温箱内外的参考压力；对长管路或液压连接，确认器件端的压力传递与高度修正。温度变化后，待参考温度与压力均达到稳定要求，再开始取样。

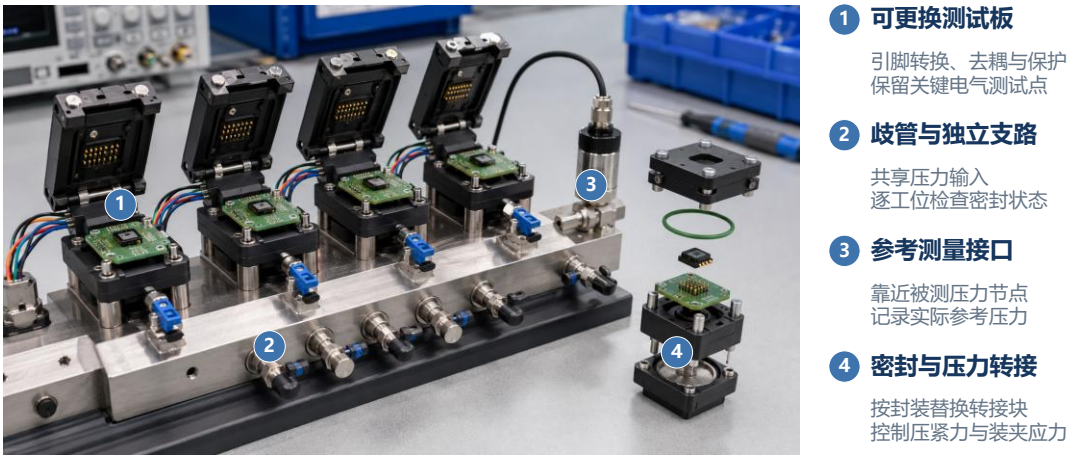


图 6 多工位压力夹具与器件连接示意图

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。

芯片数字接口按实际 I²C、SPI 或其他协议配置电平、时钟和接收方式，软件解析原始码、状态及压力换算关系。模拟电桥、电压或电流输出采用对应调理和采集通道。若项目还包含带工业通信的传感器模块，可通过独立接口单元扩展模块级通信检查，并将芯片输出、模块换算结果与通信延迟分别记录。

3.4 自动化测试与分析软件

软件提供调试和自动运行两种方式，按气动、真空或液压任务调用相应设备配置。调试时可单独控制压力、阀门、温箱和电源，观察器件原始输出；自动运行完成密封检查、预热、升降压、温度切换和采样。界面同时显示压力定义、设定值、参考实测值及工位结果，阀门动作与异常状态记录到运行日志。

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

测试从器件规定的下限点逐级升压至上限，再按相同点位回程；真空任务同时注明从环境压力向真空加载和恢复的方向。面向吸附状态或压力阈值判断时，可在关注区间增加点位。每点稳定后同步采集参考压力与输出，保留平均值、标准差和样本数，并按规定次数重复完整循环，比较迟滞、重复性及方向差异。

灵敏度可由两端输出差与参考压力差之比计算，也可取多点拟合斜率。以近似线性输出为例，S = (YH - YL)/(PH - PL)，其中 PH、PL 为同一温度、加载方向和循环中的高、低参考压力，YH、YL 为对应输出。零点输出取器件规定零点条件下的测量值，量程下限输出取下限压力点的测量值，两项结果按器件的压力定义分别记录。

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。

对已换算为压力的输出，单点误差为 Ei = PDUT,i - Pref,i；按压力跨度归一化时，δi = Ei/(PH - PL)×100%。报告注明归一化基准和算法，保留参考标准、温度、采集及支路影响的不确定度评估。非线性、迟滞和总误差分别列出，判定按约定规则执行。

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。

零点温漂比较各温度下规定零点的输出，灵敏度温漂比较对应斜率的变化。带温度补偿的器件以补偿后的最终输出评价，片内温度码作为辅助记录。包含补偿系数计算和写入时，分别设置系数计算点与独立验证点，用验证点检查写入后的输出，并保存系数版本、点位分组和写入前后数据。

稳压漂移试验在固定压力、温度与供电下连续记录器件换算压力和独立参考压力，分析两者之差随时间的变化。针对连续抓取或长时间保持工况，可分别设置稳定保持与循环后保持序列，观察零点、灵敏度及温度状态是否变化。记录时长、循环条件、采样设置和参考不确定度随任务保存，便于区分器件漂移与回路缓慢变化。

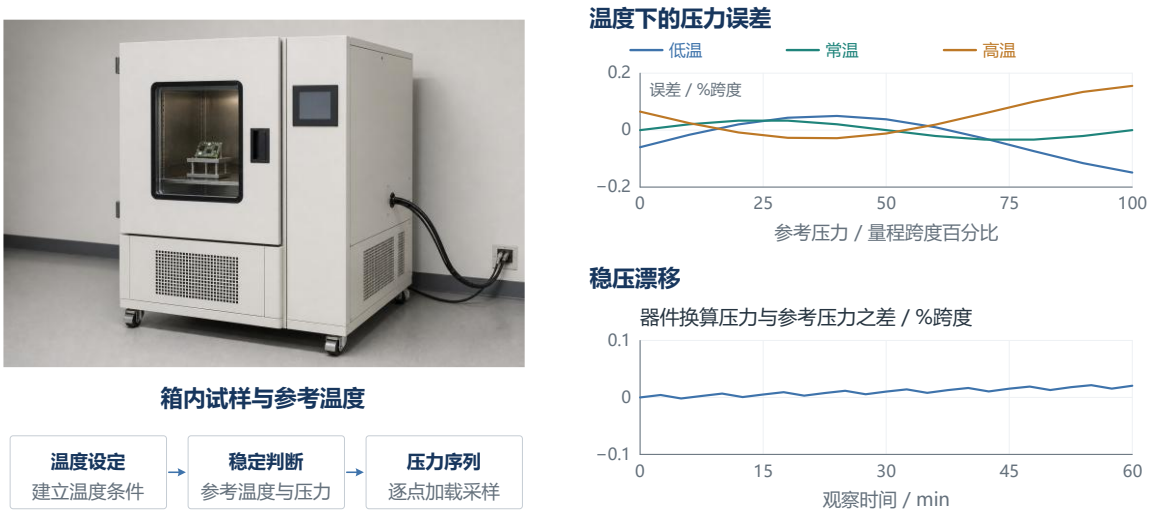


图 8 温度测试布置与典型结果分析示意图

4.3 阀控响应、压力循环与过压恢复测试

响应时间测试采用快速阀组或专用动态压力装置，按气动、真空或液压回路形成相应的加载与恢复过程。高带宽参考传感器靠近被测位置，参考波形与器件输出采用共同触发或经验证的时间基准采集。阀门切换速度、管路容积及参考通道带宽按预期响应校核，并记录阀控时刻与实际压力变化，使器件响应和回路建立压力的时间可以分别分析。

分析先检查实际压力波形，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。真空建立与释放分别评价，压力循环则按器件与任务要求设置上下限、速率、保持时间和次数。过压恢复在规定加载后恢复正常条件，复测零点、灵敏度、密封与通信状态，相关结果与首次测试关联。

过压与循环支路按最大试验压力校核额定能力，并配置独立限压、隔离及卸压装置。针对液压介质设置收集与防污染措施，真空回路核查器件与夹具的允许差压。需要进行爆破等破坏性试验时，另使用独立防护设备、远程操作和专用回路，常规性能测试与破坏性试验的数据分别归档。

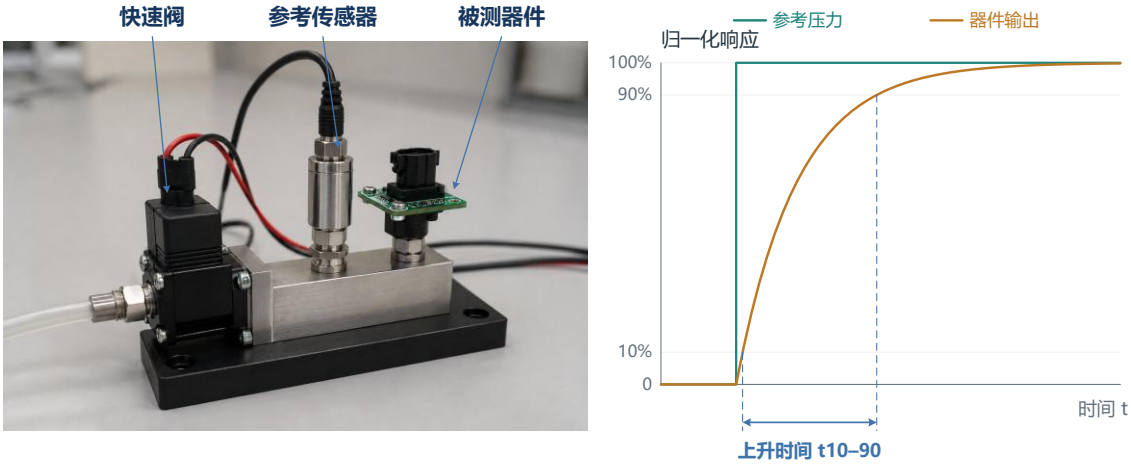


图 9 动态压力测试布置与响应时间定义示意图

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数据、更新周期和器件实际提供的状态、校验及诊断信息，并保存原始报文。配置接口检查寄存器和参数写入，工作接口检查持续更新及异常恢复。存在压力阈值或开关输出时，同时记录切换压力、回差和响应过程；带工业通信的模块按其接口另设检查项，保留通信数据与压力参考的时间关系。

五、方案核心优势

度纬科技将压力设备、温度环境、电气采集和测试软件统一配置，使机器人气动、真空和液压器件验证采用一致的数据记录与分析方式。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。
- 测项随机器人任务扩展。基础系统完成静态与温度测试，可增加真空建立和释放、阀控响应、重复压力循环及过压恢复，装配状态对比按项目需要配置。

六、总结

机器人 MEMS 压力传感器测试需要围绕实际的气动、真空或液压任务，明确压力定义、介质和变化过程。独立参考与温度记录建立输入依据，多点和循环试验评价误差及重复性，动态测试说明阀控动作中的压力传递与器件响应。将这些结果与原始数据、夹具和接口配置关联保存，可为器件选型、执行机构调试与异常分析提供依据。

度纬科技可结合机器人压力芯片的封装、介质、量程和接口，提供压力回路配置、专用夹具、测试板、采集单元及自动化软件方案。如有气动夹持、真空吸附或液压执行器件的性能验证及测试平台建设需求，欢迎联系度纬科技 010-64327909，共同确定测试配置与实施方式。