

压力传感器精度的综述

Stefan Falk¹, 施林生 (译)²

- 1. Analog Microelectronics GmbH 公司, 德国 MAINZ 55124
- 2. 上海芸圣微电子有限公司, 上海 201108

摘要: 在为特定应用选择合适传感器时, 理解传感器误差的产生原因并明确应用中哪些误差是主要的、哪些是可忽略的, 这一点至关重要。用户在采购传感器时通常只是询问传感器的精度是多少, 然而, 这种做法存在显著认知误区。由于传感器精度这个概念不是标准用语, 所以每个人都按照自己认为合适的方式来使用这个词。尽管传感器的制造商提供了传感器的众多相关数据, 但是对传感器产品进行各种有意义的比较就变成了一个繁复的计算工作, 然而用户只是想知道在具体测量中会出现什么问题, 会产生多大误差。本文将对硅压阻式压力传感器方面的误差和所谓的精度关系进行讨论。

关键词: 线性; 重复性; 迟滞; 温度漂移; 精度; 综合误差; 压力传感器
中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-883X(2025)05-0006-05
收稿日期: 2025-03-04 **DOI:** 10.16204/j.sw.issn.1006-883X.2025.05.002

Overview of Pressure Sensor Accuracy

Stefan Falk¹, SHI Linsheng (Translate)²

1. Analog Microelectronics GmbH, MAINZ 55124, Germany; 2. Shanghai Yunsheng Microelectronics Ltd., Shanghai 201108, China
Abstract: When choosing a suitable sensor for an application, it's important to understand the errors that occur and to consider which of these are relevant to your project and which can be disregarded. Each and every user of pressure sensors initially enquires about the accuracy of a sensor-giving rise to the first misunderstandings. As sensor accuracy is not a standardized concept, everyone uses it as they see fit. Conclusive comparison of products becomes a laborious mathematical exercise-provided that the manufacturers indeed supply the relevant information needed. Users merely want to know which errors they can actually reckon with when measuring pressure. This whitepaper is an attempt by AMSYS to define accuracy in the field of silicon-based pressure sensors.
Key words: linearity; repeatability; hysteresis; temperature drift; accuracy; total error band; pressure sensor

0 引言

从文字层面而言, 精度 (Accuracy) 也常被称作准确度, 这一术语在诸多场合存在误用的情况。在实践中, 它被用来描述与理想曲线的偏差, 实际上指的是不准确性。根据定义, 不准确性是各类误差的总和。因此, 在澄清精度的概念时, 应该首先从决定不准确性的误差开始。由于这里涉及到的是一系列不同的误差, 在文中将分别进行解释和讨论。

1 硅基压力传感器的构造

放大和校准的硅压阻式压力传感器结构如图 1 所示, 其核心是压力测量芯体, 所有通过 MEMS 微机械

加工制成的硅压力测量芯体都有一个压力膜片作为压敏元件, 该压力膜片是从硅片上蚀刻出来的。通过半导体的扩散工艺, 在膜片表面的合适位置注入外来原子, 形成一个电导率改变的区域, 一旦对膜片表面施加压力, 硅片的晶体结构就会随着膜片的形变而变化。因此, 这些掺杂的表面区域形成的扩散电阻值也随之变化 (晶体位移形成的压变电阻效应)。如果将这些扩散的电阻连接成惠斯通电桥, 然后通过施加电流或电压就可以获得毫伏范围内的与压力成正比的电桥差分信号, 该信号可以用合适的放大电路进行放大采集校准等处理。

图 1 左侧为 MEMS 硅压阻芯体, 右侧为专用集成

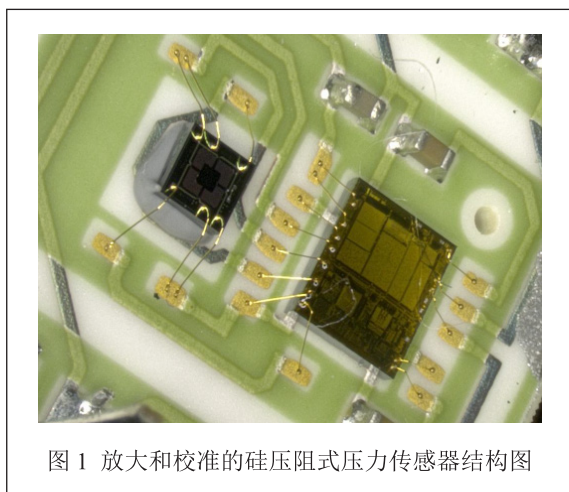


图1 放大和校准的硅压阻式压力传感器结构图

电路 ASIC（放大、校准、存储、输出），差分压力传感器的压力连接端口位于硅压阻芯体背面和 ASIC 的右上方。

为了获取标准的压力传感器输出值，通常采用一种专用集成电路（Application Specific Integrated Circuit, ASIC）连接到压力测量芯体上，通过这个专用集成电路对压力芯体输出的毫伏信号进行放大、A/D 转换、温度补偿、线性化和校准。在各种压力和温度条件下为每个单独的压力传感器进行测量，与理想压力曲线比较后确定校正系数并将其存储在电可擦可编程只读存储器（Electrically Erasable Programmable Read Only Memory, EEPROM）中。

专用集成电路中的微处理器在校正系数的帮助下对相应的压力和温度原始值进行数字化修正和校准处理，此时的压力和温度通过 I²C /SPI 输出数字信号或者通过 D/A 转换器输出模拟信号。

2 存在误差的压力测量传感器：压力测量芯体

对于测量压力范围在 300 mbar 至 30 bar 的测量芯体，其硅片尺寸约为 2 mm×2 mm×0.8 mm。压力测量芯体的大小主要取决于压力范围和半导体制造技术。较小的压力范围需要较大的压力膜片，并且对生产要求更高，这些都会增加生产成本。绝对压力传感器的测量芯体由封闭的派热克斯（pyrex）玻璃基座（灰色）、硅片（蓝色）以及压力膜片（浅蓝色）构成，如图2所示。通过对部分硅片的蚀刻，在硅片和玻璃之间产生了一

个空腔，同时这部分硅片形成了一个压力膜片，根据要测量的压力范围，膜片的厚度控制在 10 ~ 50 μm 之间。与绝对压力芯体不同，相对压力和差分压力的测量芯体在膜片下方没有真空空腔，而是在玻璃基座上有一个小孔，通过该孔可以将另外一侧的压力（ P_2 ）与从上方施加的压力（ P_1 ）进行比较。

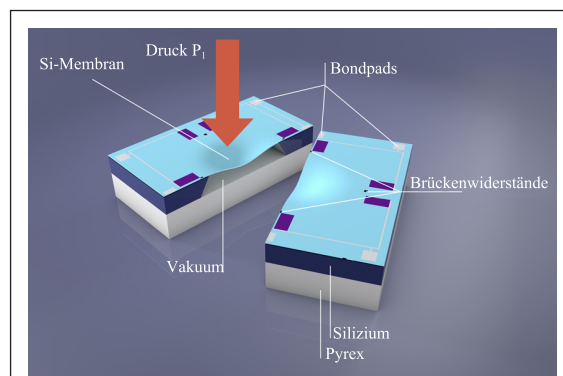


图2 测量绝对压力的 MEMS 硅压阻式压力测量芯体的典型结构图

压力芯体表面上的亮线是带有铝焊盘（亮方块）的铝引线，用于连接到外部电路。紫色的长方形是通过扩散形成的与底层扩散硅电阻连接的导体。底层的扩散硅电阻（不可见）在二个紫色的长方形之间，也就是在机械应力最大的拱形边缘。在压力芯体的中心，可以看到由外部大气压 P_1 引起的压力膜片变形（拱形凸起）。

以下所描述的误差产生原因既有在制造过程中产生的，也有材料本身的物理缺陷造成的：

- 扩散而成的应变测量电阻是具有明显的温度依赖性。因此，当向测量电桥施加电压后，不仅单个扩散电阻值会发生变化，通过的电流也会发生变化，同时电阻本身也会发热。

- 传感器附近的温度可以通过电桥的电阻值来测量，也可以通过集成电路 ASIC 中的二极管来测量，这 2 种测量温度的方法对于信号处理和压力的测量速度方面都有各自的优缺点。

- 实际上，组成测量电桥的 4 个扩散的应变测量电阻的值并不完全相同。因此，电桥输出的信号存在压力为零时的零点偏差和有压力下存在的偏移和误差。

- 由于半导体工艺中存在大量的掩模步骤，（干法）蚀刻过程通常会导致传感器之间的偏差。
- 整个传感器是由测量压力芯体和专用集成电路 ASIC 组装在某种基板上，由于基板本身与压力芯体以及集成电路的应力不同，也会出现零点误差，这些误差是可以通过与硅具有相似热膨胀系数的陶瓷基板来实现最小化。

3 压力传感器的重要参数

本文将通过分类讨论的方式，系统阐述压力传感器各类误差的来源与特性。现以一个典型的硅压阻式压力传感器为例，其误差主要可分为 2 类：可修正误差和不可修正误差（见表 1）。可修正误差是指在传感器生产和校准过程中可以通过适当的信号处理以及算法减少或完全修正的误差；不可修正误差是由传感器的材料、结构特性和外部环境因素所决定，这类误差无法通过校准和修正来消除。

表 1 硅压力传感器误差分类

可修正误差	不可修正误差
零点误差	热迟滞
满度误差	压力迟滞
非线性	长时间漂移
零点温度误差	供电电压依赖
满度温度误差	不可重复性

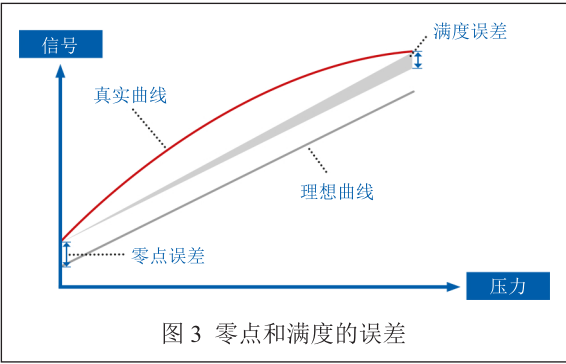
3.1 可修正误差

3.1.1 零点误差（Zero-Offset）

零点误差是指在室温下没有施加到压力芯体的情况下传感器输出的数值与理想数值的差值。这种误差可能是由压力芯体、组装和连接技术或后续电子电路引起的，如图 3 所示。

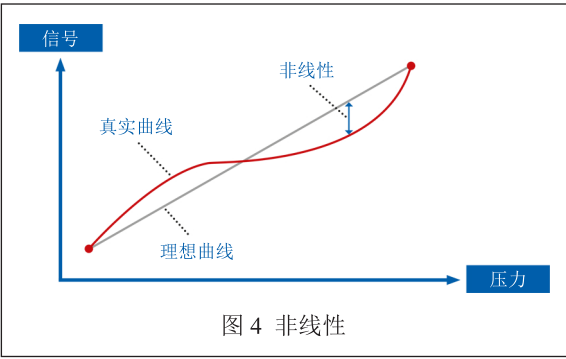
3.1.2 满度误差（Output Span- / Full Scale）

满度误差（满量程误差）是指在室温和固定电源（电压 / 电流）条件下，当施加至量程最大压力时，传感器的输出值与理想数值的差值，如图 3 所示。它是由压力芯体的灵敏度和电子放大处理电路等引起，一般情况下，满度误差计算不考虑零点误差，单位为 %FSO（FSO 指满量程输出值）。



3.1.3 非线性

理想压力传感器的传递函数（输出信号作为压力的函数）是连续线性的，测量的真实数据与该理想曲线的偏差称为非线性，如图 4 所示。在大多数情况下，理想曲线是采用最佳直线拟合（Best Fit Straight Line, BFSL）的方法确定的。



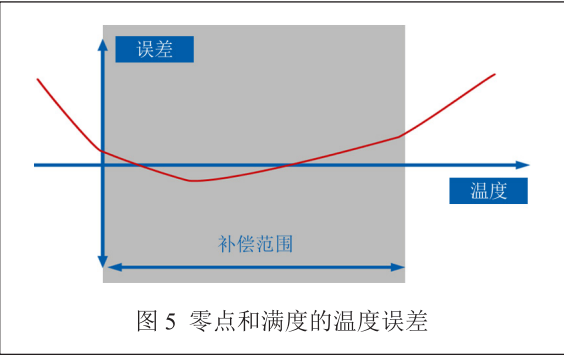
3.1.4 零点温度误差（TCO）

压力传感器的零点输出与温度变化相关，如图 5 所示。原因是硅压阻传感器上的扩散硅电阻是随温度变化而变化的，零点温度误差（零点温度系数 TCO）即由此产生，它是在没有压力施加到压力芯体的情况下在补偿温度范围内（最低温度与最高温度之间）的零点输出值与理想数值之差的最大值。用户需确认产品性能数据表中的零点温度误差指标，是针对补偿温度范围还是工作温度范围。TCO 的单位为 %FSO/°C。

3.1.5 满度温度误差（TCS）

与零点温度误差一样，满度输出也会随温度变化产生误差，满度温度误差（满度温度系数 TCS）曲线描述了这一误差的变化情况，如图 5 所示。满度温度误差是在施加量程最大的压力值下，在补偿温度范围

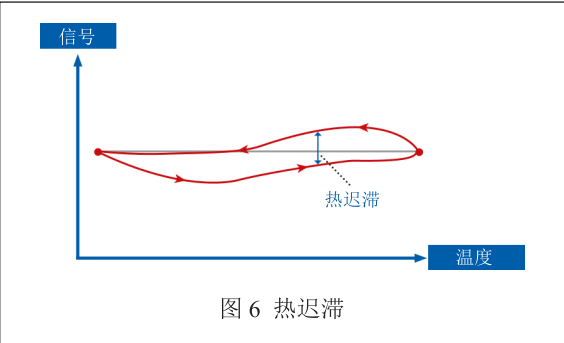
内（最低温度与最高温度之间）的满度输出值与理想数值之差的最大值。TCS 的单位为 %FSO/°C。



3.2 不可修正误差

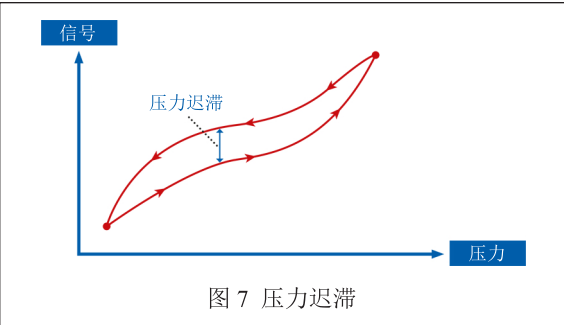
3.2.1 热迟滞

在不施加压力的情况下测量得到的热迟滞如图 6 所示，它是在工作温度范围内最高和最低温度之间进行温度循环后，传感器输出的零点信号（Offset）的最大偏差。热迟滞可能与温度循环时间和温度间隔有关。



3.2.2 压力迟滞

通常情况下，压力迟滞的测量是在室温环境中开展的，具体测量情况如图 7 所示，它是在施加最大和最小压力之间的压力循环周期后，在整个压力范围内



的最大压力偏差。压力迟滞可能和压力循环时间（压力变化速度）有关。

3.2.3 长时间漂移

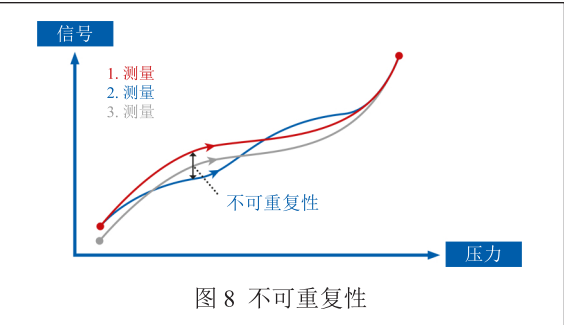
长期稳定性是指输出信号在长时间（通常为 1 年或 10 年）内的变化程度，它可以在特殊的测试条件下（例如在通电情况和室温下）或不通电储存后进行测量。此外，可通过一些方法加速确定长期漂移情况，例如采用人工老化手段，利用高温（依据阿伦尼乌斯公式）和高湿度环境处理传感器，由此测量的数据应该在产品数据表中加以说明，它们应该和所谓的长期稳定性是明显相关的。了解不同形式的硅压力传感器结构及其功能可以得到更多不同种类传感器的特点和品质^[1]。

3.2.4 供电电压依赖

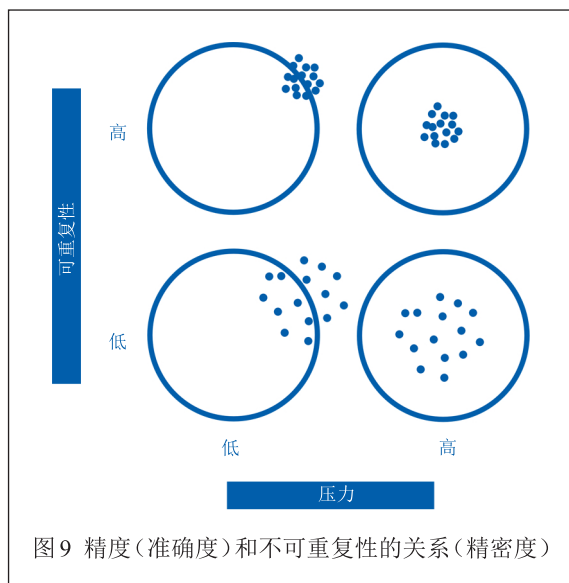
电源电压的稳定对压力传感器输出信号有较大影响，特别是没有电源电压稳定措施的 OEM 半成品压力传感器。有些 OEM 压力传感器的模拟输出为比例输出，即输出信号在一定范围内与所加的电源电压的变化成正比^[2]。这种输出信号与电源电压成比例变化的特性特别适用于存在电源波动的应用场景（如电池供电设备），因为可以利用这种波动信号作为下一级信号处理的参考，最终消除该波动引起的误差。当采用稳定电源供电时，压力传感器的数字 / 模拟输出将不再受电源电压影响。

3.2.5 不可重复性

不可重复性是指在相同测量条件下重复压力测量时会得到不一致的传递函数，如图 8 所示。可重复性（有时也被称为精密度 precision）可以通过单个传感器的多次测量来确定，也可通过不同生产批次的许多传感器来确定，这里还涉及到传感器可互换性的问题。



不同精度（准确度）的差异如图 9 所示。可以将其想象为飞镖靶，良好的可重复性（精密度）意味着命中点很集中，但它们不一定都在指定的误差范围内，即使精度很高，测量值却是有较大的离散。因此，良好的可重复性通常是测量的真正目标，特别是在测量的绝对值不那么重要的情况下。然而，即使重复性很高，系统误差也可能导致测量值超出所需范围，例如在规定工作温度之外使用传感器。因此，（不）可重复性作为一种统计不确定性，绝对是误差分析的一部分。



3.3 综合表述：综合误差（总误差）

根据定义，不准确性是所有相关误差的总和。严格来说，由各种物理原因引起的误差都需要通过高斯误差加法（Gaussian Error Addition）来确认，即计算各个误差平方和的根。由此得到的误差总和要么是指在环境温度下的总误差，要么是在工作温度范围内以误差带的形式表示的总误差 TEB（Total Error Band 总误差带）。通常总误差单位为 %FSO。

测量不准确的大部分数值来自被统计的每个传感器的个体误差，生产商通常会在产品的数据表中通过对几种主要的误差给出典型值和最大最小值的分布来说明产品的特性。由于每个传感器在校准过程中都是单独测量的，因此通过筛选可以得到误差更小的传感器（增加成本）。

4 结束语

在选择传感器时，了解产生的误差以及判断哪些误差与具体应用相关、哪些可以忽略，这一点非常重要。通过权衡传感器几种不同误差，可以为项目选择最合适的传感器，比如有针对性地优先考虑部分重要参数，比如在一个小的温度范围内有着很好的可重复性的参数。此时，绝对误差和温度影响可以忽略不计。

在许多应用中，对总误差（TEB）的关注比较少，然而它却是各个应用选择的重要开始。选择合适的传感器首先需要比较应用项目的特定要求和传感器采集数据中的误差类型。通常大家在选择传感器的时候只是根据一些模糊的概念，而不是对不同制造商产品的数据表中参数进行直接比较。因此，个性化的技术咨询可以节省大量时间去做比较测试，从而缩短研发的时间。

参考文献

- [1] Aufbauformen von drucksensoren-von der siliziummesszelle zum drucktransmitter[EB/OL]. <https://www.amsys.de/downloads/whitepaper/Aufbauformen-Drucksensor-Von-der-Siliziummesszelle-zum-Transmitter-AMSYS-WP01.pdf>
- [2] Ratiometrie in der drucksensorik am beispiel des AMS 5812[EB/OL]. <https://www.amsys.de/downloads/notes/AMS5812-Ratiometrie-in-der-Drucksensorik-AMSYS-521d.pdf>

作者简介

Stefan Falk: 德国 AMG 公司，德国电子学硕士，研究方向为压力传感器和信号处理。

施林生（译）：上海芸圣微电子有限公司，高级工程师，研究方向为压力传感器和信号处理。

通信地址：上海市金都路 3000 号 1422 室

邮编：201108

邮箱：zzhiyun@126.com