

电容薄膜真空计的温度特性研究

吴成耀 成永军* 孙雯君 裴晓强 冉欣 董猛 赵澜
(兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室 兰州 730000)

Temperature Characteristics of Capacitance Diaphragm Gauge

WU Chengyao, CHENG Yongjun*, SUN Wenjun, PEI Xiaoqiang, RAN Xin, DONG Meng, ZHAO Lan
(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract Capacitance Diaphragm Gauge (CDG) is a type of sensor commonly used under low vacuum with high accuracy and stability. Temperature is one of the most important factors affecting its measurement accuracy. When the ambient temperature changes, the measurement results of CDGs will also drift accordingly. We experimented with the effect of temperature on CDGs and quantified the measurement errors of heated and unheated CDGs in the environment of $-30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$. The experimental results show that the measurement results of the heated CDGs are stable at the rated temperature $0^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$, and the measurement accuracy will deteriorate if the temperature exceeds this range. The error caused by the temperature for the unheated CDG is relatively large. The temperature-pressure error surface proposed in this paper can effectively reduce the measurement error of the unheated CDG and improve its accuracy.

Keywords Capacitance diaphragm gauge, Temperature characteristic, Interpolation of Delaunay

摘要 电容薄膜真空计(Capacitance Diaphragm Gauge, CDG)是一种常用的粗低真空测量传感器,具有较高的测量精度和稳定性。温度是影响真空计量准确性的重要因素之一,环境温度的变化会导致CDG的测量结果发生较大的偏移。为探究温度对CDG测量结果的影响情况,开展了温度环境实验,考察了保温型与非保温型CDG在 $-30^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 环境中测量结果的变化情况。实验结果表明,保温型CDG在额定温度 $0^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ 环境中测量结果较为稳定,温度高于或低于该区间范围时,测量结果会发生一定程度的偏移;温度对非保温型CDG造成的影响较大,利用温度-压力误差曲面可以修正CDG误差,提高真空计测量精度。

关键词 电容薄膜真空计 温度特性 Delaunay三角剖分插值

中图分类号: TB772 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202209007

在粗低真空环境中,当需要精确测量气体的真空度时,通常选用电容薄膜真空计(Capacitance Diaphragm Gauge, CDG)^[1-3]。CDG的测量原理如图1所示,主要由弹性膜片、固定电极、参考腔以及测量腔构成。真空参考腔通常抽至真空状态,并用吸气剂维持其真空环境。当测量腔与参考腔处于同样的真空状态时,弹性膜片处于平衡位置,此时固定电极与膜片之间的电容 C 最小;当测量腔真空度增大时,弹性膜片逐渐偏向固定电极一侧,使得电容 C 增大。通过测量电容 C 即可实现对测量腔真空度的测量^[4-5]。

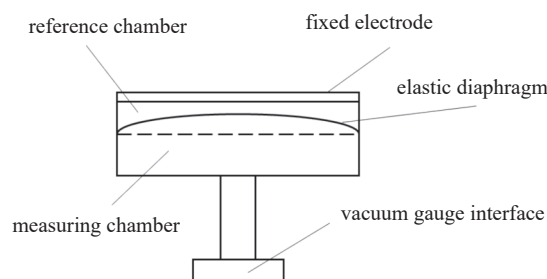


图1 电容薄膜真空计测量原理图

Fig. 1 Measuring principle diagram of CDG

相较于其他类型的真空计,CDG具有较高的测量精度和稳定性,测量精度可达读数的0.5%甚至

更低^[6]。但是当真空计的测量环境温度发生变化时,测量结果会发生一定的偏移。各 CDG 生产厂商通常将真空计的零点温度效应和满量程温度效应单独给出,并未将温度效应计算入真空计的测量精度中。在考虑温度效应的情况下,部分真空计的测量精度将大大降低。

为了改善真空计的温度效应问题,CDG 研发公司对真空计的结构进行了优化,并通过加装恒温装置,将真空计的环境温度维持到室温以上,以保持真空计测量结果的稳定。结构的优化也难以完全抑制温度对 CDG 测量精度的影响,加装恒温装置虽然很好的抑制了温度的影响,但温度梯度的产生导致了真空系统出现了热传导效应,CDG 测量腔中的压力与实际被测压力存在一定的偏差。研究者针对 CDG 的热传导效应开展了大量的研究工作,对其测量结果进行修正,但恒温式 CDG 的另一些弊端仍然无法解决^[7-9]。恒温装置给真空系统带来了一定的热量,对真空系统会产生一定的影响。而恒温式 CDG 在温度较低的情况下进行测量时,其功率会增大,当功率无法满足时,CDG 仍然会发生温度漂移的现象。近来研究表明,CDG 在高温烘烤恢复后其测量结果与烘烤之前表现出较高的一致性^[10],环境温度与其造成的误差具有一定的关系。为研究温度补偿解决上述问题的可行性,本文对 CDG 的温度特性开展了相关的研究工作。

1 温度实验

实验所采用的实验装置如图2所示,研究对象保温型真空计 G2、非保温型真空计 G3 放置于恒温箱内,保温型真空计 G1 放置于室温环境中用于和 G2、G3 进行比对。升温时通过恒温箱中的加热装置将恒温箱中的温度提升至所需温度;降温时,通过电磁阀 V4 将液氮引入恒温箱,液氮的蒸发使得恒温箱温度下降。真空系统的真空度通过 V1、V2、V3 进行调节。

G1、G2 以及 G3 均为 1333 Pa 类型的普通金属型 CDG,其薄膜由镍铬合金 3J53 制成。实验利用 99.9% 的 N₂ 对真空计性能进行测试。由于真空计通过橡胶圈连接至真空系统中,温度过低会造成密封橡胶圈失效,使得系统无法维持真空,因此恒温箱中的温度最低限定为-30℃。保温型真空计 G2 的恒温温度为 45℃,温度高于 45℃ 时 G2 的恒温装

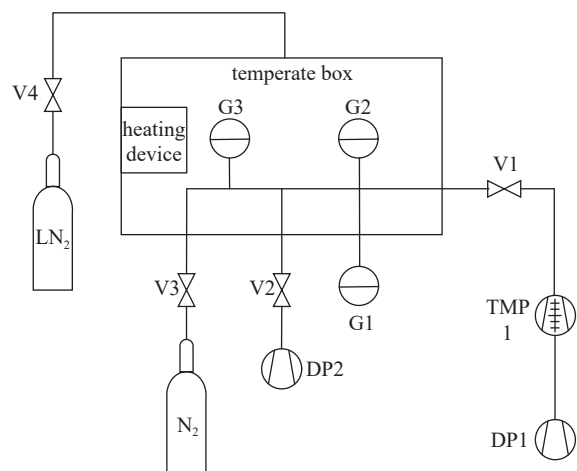


图2 温度实验装置结构示意图 V1、V2、V3-截止阀, V4-电磁阀, N2-氮气, LN2-液氮, DP1、DP2-机械泵, TMP1-分子泵

Fig. 2 Schematic diagram of the temperature experimental device V1, V2, V3-globe valve, V4-solenoid valve, N2-nitrogen, LN2-liquid nitrogen, DP1, DP2-mechanical pump, TMP1-molecular pump

置无法工作, G2 可视为普通型 CDG, 其特性与 G3 相同, 因此考虑将实验的最高温度设置为 50℃。实验包含升温过程与降温过程, 每隔 5℃ 改变真空系统内的压力进行一组实验。

实验时, 首先打开 V1, 将真空系统的压力抽至 CDG 的测量下限, 并记录 G1、G2 与 G3 的值, 之后将温度调节至需要测量的点, 等待 30 min 后开始调节真空系统的压力。调节真空度时, 关闭 V1 并打开 V3, 将 N₂ 引入系统, 将真空度调节至 1200 Pa 左右, 之后关闭 V3 打开 V2 开始抽气, 在 G1 大致达到 1100、900、700、500、300、100、90、70、50 Pa 时, 记录真空计 G2 以及 G3 的读数, 此时机械泵抽气速度缓慢, 关闭 V2, 打开 V1 继续对真空系统进行抽气, 在 G1 示数在 30、10、9、7、5、3 Pa 以及真空度达到 G1 的测量下限时, 记录 G2 以及 G3 的值。完成一组实验后, 改变恒温箱的温度, 进行下一组实验。

2 试验结果

参考真空计 G1 在实验过程中始终处于室温环境, 表1为真空计 G1 在零点时的离差, 可以看出测量值与零点的平均值之间的差值小于 0.08 Pa, 小于满量程的 0.006 %, 说明 G1 的测量结果具有很好的稳定性, 恒温箱内温度的变化对其测量结果几乎没有影响。

表 1 G1 在不同温度下零点测量值与平均值间的偏差

Tab. 1 Deviation between the zero-point measured value and the mean value of G1 at different temperatures

$T/^{\circ}\text{C}$	p/Pa	$\Delta p\%$ (F.S.)
-20	0.071333	0.0054%
-15	0.051333	0.0039%
-10	0.041333	0.0031%
-5	0.021333	0.0016%
0	-0.048667	-0.0037%
5	-0.058667	-0.0044%
10	-0.078667	-0.0059%
15	0.001333	0.0001%
20	-0.008667	-0.0007%
25	-0.008667	-0.0007%
30	0.031333	0.0024%
35	-0.018667	-0.0014%
40	0.001333	0.0001%
45	-0.028667	-0.0022%
50	0.031333	0.0024%

CDG 的测量结果如图 3 所示, 横坐标轴为用于对比的标准真空计 G1, 纵坐标轴为放置在恒温箱中的真空计。通过实验结果可以看出, 在不同的温度下, 保温型真空计 G2 的测量结果一致性较好, 而没有保温装置的真空计 G3 的零点和满量程均出现了较大的漂移情况。

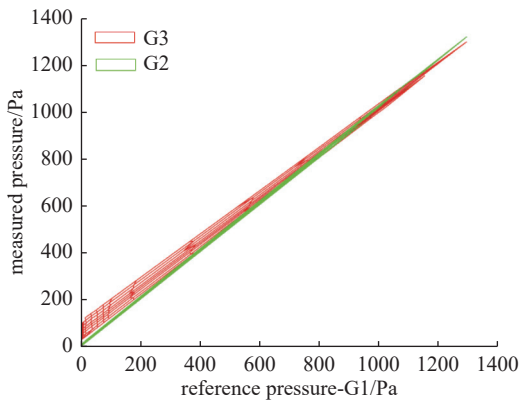


图3 不同温度下电容薄膜真空计的测量结果

Fig. 3 Measurement results of capacitive film vacuum gauge at different temperatures

为了更加清晰的了解 CDG 示数随环境温度的变化情况, 考察了真空计 G2、G3 与参考真空计 G1 之间的误差变化情况, 并将其绘制在三维坐标系中如图 4 所示。根据测试结果可以看出, 保温型真空计 G2 与 G1 之间的误差较小, 可近似视为恒定值, 误差大小与环境温度、真空度变化情况无关; 而非

保温型的真空计 G3 与 G1 之间的存在较大的误差, 这种误差随着温度和真空系统中压力的变化而变化。从多次实验的结果可以看出, G3 与 G1 的误差随着温度与真空系统中压力的变化表现出一定的重复性, 因此可以研究温度对非保温型真空计测量误差的影响情况, 进而提高 G3 的测量精度。

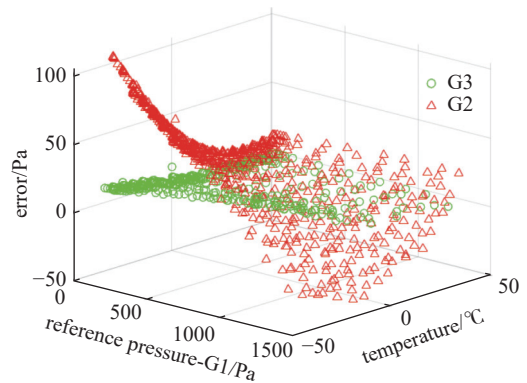


图4 不同温度、压力下 G2、G3 的误差测量结果

Fig. 4 Error measurement results of G2 and G3 at different temperatures and pressures

2.1 误差曲面的估算

在修正温度对 G3 测量结果的影响时, 需要获得任意温度、压力下真空计产生的误差值。通过实验获得的数据均为离散的值, 若要获得真空计在任意温度、压力下的误差, 可利用插值的方法对所需点的误差进行估计。在实验过程中, 每组实验的温度可视为一组, 但是真空系统的压力很难在每次测量时调节为恒定值, 因此无法划定均匀的网格对真空计进行双线性插值处理。因此考虑使用基于 Delaunay 三角剖分的线性插值方法获取每个点的误差值^[11]。

如图 5 所示, 利用 Delaunay 三角剖分方法可以将数据压力-温度坐标平面划分互不相交的三角形区域。在这些三角形中, 任意一个三角形的外接圆不包含该三角形以外的点。Delaunay 三角剖分所形成的三角形集合具有的最小角最大的特点, 目前得到了广泛的应用。在完成对平面网格的划分后, 即可用三角形顶点坐标的值计算可以在三角形区域内任意一点对应的误差的值。记三维坐标系中, 三角形三个顶点及其对应的误差值为 $A(p_1, T_1, e_1)$ 、 $B(p_2, T_2, e_2)$ 和 $C(p_3, T_3, e_3)$, 假设在三角区域内每个点的坐标均在同一平面, 则设该平面为:

$$e = a_1 p + a_2 T + a_3 \quad (1)$$

式中 a 、 b 和 c 为平面的参数, p 为压力, T 为温度, e 为 CDG 在 (p, T) 点处产生的误差值。由于三角形三个点均在该平面上, 因此可以得到:

$$\begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ T_1 & T_2 & T_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{a}\mathbf{X} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{e}$ 为误差向量, $\mathbf{a}$ 为参数向量, $\mathbf{X}$ 为三角形坐标矩阵, 通过矩阵运算可以得到参数向量 $\mathbf{a}$ 的值, 进而求解出三角形内任意一点 $D(p, T)$ 的误差值 $\mathbf{e}$ 。

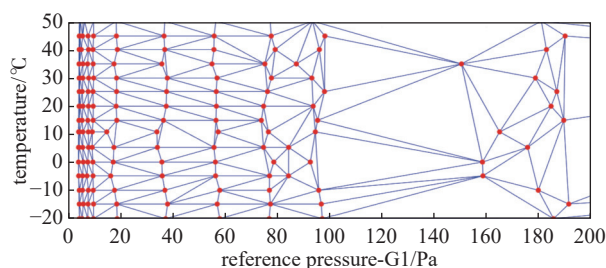


图5 利用 Delaunay 三角剖分方法对数据进行网格划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of meshing data using Delaunay triangulation method

2.2 电容薄膜真空计的温度误差曲面

通过上节方法, 可以计算出每个所需点的误差值, 绘制出的 CDG 的坐标曲面如图 6 所示, 其更加直观的显示了真空计的误差在不同压力点、不同温度下的变化情况。

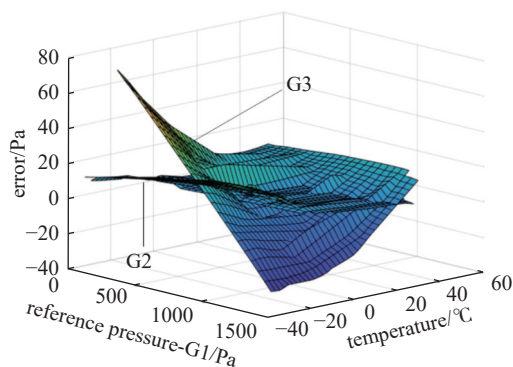


图6 电容薄膜真空计温度-压力误差曲面

Fig. 6 Temperature-pressure error surface of capacitance film vacuum gauge

真空计 G2 在其正常工作范围内 ($0^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$) 时误差最小, 而温度低于 0°C 后, 其误差有随着温度的降低而逐渐变大的趋势; 真空计 G3 在常温时 ($20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$) 的误差相对较小, 随着温度的升高或降

低, 真空计的误差均有变大的趋势, 这种现象在零点尤为明显, 在 -30°C 时最大误差达到了 100 Pa, 温度产生的读数误差达到了满量程的 7.5%, 这种误差对于一些较为精密的实验影响相当大。

2.3 电容薄膜真空计的温度特性

零点温度温度系数和满量程温度系数是衡量 CDG 测量准确度的重要指标, 从图 6 所示的误差曲面中可以截取得到 CDG 在零点以及满量程附近温度造成的误差曲线。

图 7 为 CDG 在 10 Pa 时的温度误差曲线, 该曲线表征了 CDG 测量误差在零点时受到温度影响的情况。可以看出保温型真空计的误差受到温度干扰很小, 在 $10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内时, G2 与 G1 的误差几乎保持不变, 表现出很好的温度稳定性。当温度小于 0°C 后, 随着温度的降低, 真空计 G2 与 G1 的误差逐渐增大, 这可能是由于真空计的加热功率已经达到最大, 无法继续将真空计的温度维持到设定温度造成。

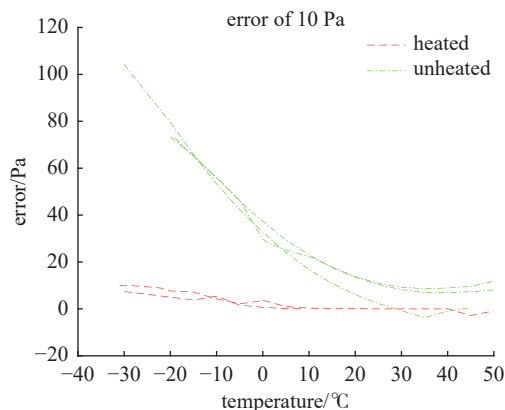


图7 电容薄膜真空计(1333-Pa)在 10 Pa 时的温度误差曲线
Fig. 7 Temperature error curve of capacitance thin film gauge (1333-Pa) at 10 Pa

非保温型的真空计受到温度的影响较大, 并表现出一定的非线性。真空计 G3 与 G1 的误差在 $30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 时较为恒定, 随着温度的持续降低, G3 与 G1 之间的误差也越来越大。当 CDG 接近零点位置时, 薄膜两侧的压差较小, 此时薄膜几乎不发生弹性形变。温度变化造成的零点漂移可能是由电极与薄膜具有不同的热膨胀系数, 当环境温度降低时, 电极与薄膜之间的间隙减小, 进而使得电容变大, 测得的结果偏大。除此之外, 真空计的检测电路也会受到温度的影响, 图 7 中 G3 在 $30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$

时, 误差有先减小后增大的趋势, 这种现象可能是传感器与检测电路共同作用的结果。

图 8 显示了 CDG 在接近满量程时的误差变化情况。保温型 CDG 误差在小于 0°C 时依然较小, 但是在小于 0°C 时, 误差随着温度的降低而逐渐增大, 这种现象进一步印证了保温型 CDG 在低温环境中存在功率不足的问题。非保温型的 CDG 在满量程附近明显出现了先减小后增大的趋势, 相较于在零点, 非保温型的 CDG 误差明显有所减小, 除了薄膜与电极之间的间隙以及电路放大倍数随温度发生变化外, 薄膜的挠度变化也是造成这种现象的因素之一。

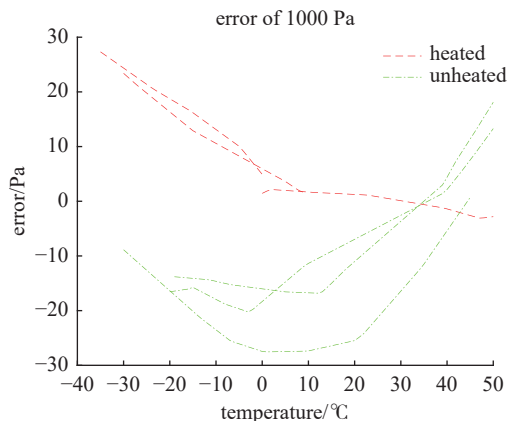


图8 电容薄膜真空计(1333-Pa)在 1000 Pa 时的温度误差曲线

Fig. 8 Temperature error curve of capacitance thin film gauge (1333-Pa) at 1000 Pa

对比图 7 与图 8 可以发现, 在 -30°C 时非保温型 CDG 的误差在满量程时下降了约 110 Pa, 当温度为 50°C 时满量程误差上升了约 5 Pa。即在同样的压力下, 温度越低, 非保温型 CDG 的挠度变化越小, 反之则挠度变化增大。

2.4 非保温型 CDG 的温度误差修正

为验证温度-压力误差曲面修正的效果, 采用一组温度实验的数据绘制温度-压力误差曲面。得到修正曲面后, 对分别用氮气和空气进行实验的数据进行修正, 修正前后的误差如图 9 所示。

修正结果显示, 该方法具有良好的效果, 在利用 N_2 进行的实验中, 非保温型 CDG 的测量误差从修正前最大 6%(F.S.)下降到了 0.75%(F.S.), 测量精度得到了大幅提升。CDG 是一种绝对型真空计, 其测量结果与被测气体种类无关。从图 9 中可以看出,

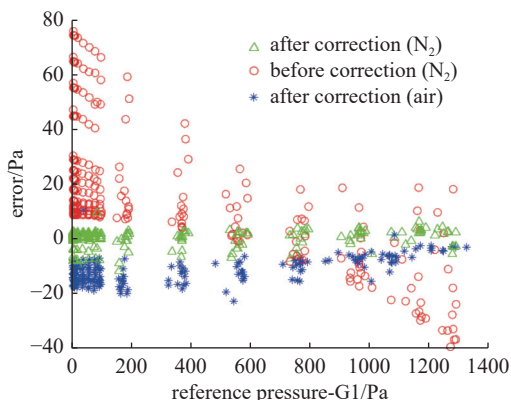


图9 温度-压力误差曲面修正前后误差对比图

Fig. 9 Error comparison chart of temperature-pressure error surface before and after correction

利用温度误差曲面修正后的空气组实验数据同样具有较好的修正效果, 但其误差整体上向负方向漂移了 5 Pa 左右, 造成这种现象是由于空气组实验相较于其他两组实验晚两个月进行, CDG 的膜受到应力影响产生了一个固定的误差, 这个误差后期可以通过定期的校准进行消除。

利用误差曲面修正的方法显现出了优异的修正效果。相较于给 CDG 添加保温装置, 该方法不仅避免了向真空系统中增加热源, 同时也解决了保温型 CDG 只能在特定温度区间内稳定测量的缺陷。

3 结论

本文针对保温型 CDG 和非保温型真空计开展了 -30°C ~ 50°C 的温度效应实验, 实验发现保温型真空计在额定温度 0°C ~ 45°C 范围内时具有较好的测量精度, 超出温度范围后真空计的测量结果出现了一定的误差。温度对非保温型 CDG 的影响较大, 利用基于三角剖分的插值方法获得真空计的误差曲面, 可以对真空计的测量误差进行修正, 使其在不同温度、压力下均达到较好的测量结果。

参 考 文 献

- [1] Song P, Ma Z, Ma J, et al. Recent progress of miniature MEMS pressure sensors[J]. *Micromachines*, 2020, 11(1): 56
- [2] Hyland R W, Shaffer R L. Recommended practices for the calibration and use of capacitance diaphragm gages as transfer standards[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1991, 9(6): 2843-2863
- [3] Feldman J, Paul M, Xu G, et al. Effects of natural zeo-

- lites on field-scale geologic noble gas transport[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, 220: 106279
- [4] Jousten K, Naef S. On the stability of capacitance-diaphragm gauges with ceramic membranes[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2011, 29(1): 011011
- [5] Patra J C, Panda G, Baliarsingh R. Artificial neural network-based nonlinearity estimation of pressure sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1994, 43(6): 874–881
- [6] Sullivan J J. Development of variable capacitance pressure transducers for vacuum applications[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1985, 3(3): 1721–1730
- [7] Nishizawa S I, Hirata M. DSMC analysis of thermal transpiration of capacitance diaphragm gauge[J]. *Vacuum*, 2002, 67(3-4): 301–306
- [8] Daudé B, Elandaloussi H, Janssen C. On the gas dependence of thermal transpiration and a critical appraisal of correction methods for capacitive diaphragm gauges[J]. *Vacuum*, 2014, 104: 77–87
- [9] Setina J. New approach to corrections for thermal transpiration effects in capacitance diaphragm gauges[J]. *Metrologia*, 1999, 36(6): 623
- [10] Scherschligt J, Barker D, Eckel S, et al. Stability of bakeable capacitance diaphragm gauges[J]. *Vacuum*, 2022, 197: 110801
- [11] Amidror I. Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey[J]. *Journal of electronic imaging*, 2002, 11(2): 157–176