

有关陶瓷膜片型电容膜片真空计的稳定性

K. Jousten^{a)}

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Abbestr. 2-12, 10587 Berlin, Germany

Simon Naef^{b)}

INFICON AG, Alte Landstrasse 6, 9496 Balzers, Liechtenstein

(2010 年 7 月 2 日收稿; 2010 年 11 月 29 日录取; 2011 年 1 月 4 日出版)

陶瓷薄膜或膜片型电容膜片真空计进入市场约 15 年. 这些设备全量程从 13 帕至 133 仟帕的长期稳定性在过去十年中已测试, 被制造商用作生产线上参考真空计. 这些参考真空计每年与初级标准进行校准. 发现这些设备的再现性与它们的全量程有关. 对 13 帕, 近全量程的年再现性在 0.02% 与 0.05% 间变化, 对全量程 133 帕和更高, 在全量程的 0.005% 与 0.03% 间变化. 陶瓷电容膜片真空计对全量程 133 帕和 1.3 仟帕的再现性大大低于初级标准静态膨胀法系统的不定性.

© 2011 美国真空学会. [DOI: 10.1116/1.3529023]

I. 引言

在过去的 15 年中, 陶瓷薄膜或称膜片型的电容膜片真空计 (CDGs) 适用于许多不同的应用, 如刻蚀, 化学气相沉积, 物理气相沉积, 薄膜沉积, 和标准传递中, 用作压强测量已成为普及的仪器. INFICON, 真空计的著名制造商, 从 2000 年开始与联邦物理技术研究院 (PTB) 合作, 使他们的 CDGs 成为参考标准和确保生产线的测量规范. 每年在 PTB 校准全量程 (FSs), 从 13.3 帕至 133 仟帕的 CDGs. 由于一次同时校准 4 台 CDGs, 所有真空计的变化使 PTB 有机会检验原型标准的再现性.

II. 带陶瓷膜片的电容膜片真空计

作为最精确的商用真空测量设备, 电容膜片真空计适合于过程应用. 测量原理基于膜片两侧差压下产生的变形.

取代基于全金属的传感器结构, INFICON 的陶瓷膜片真空计技术基于烧结的氧化铝 (Al_2O_3). 膜片和整个外壳用纯度大于 >99.5% 的纯 Al_2O_3 制造.

膜片与外壳的结合采用玻璃焊料. 上室是吸气剂圆顶, 膜片形成参考腔室, 用非蒸发吸气剂将它保持在低真空范围. 下室是用膜片形成的测量腔室. 电极位于参考真空侧和形成电容器 (见图 1).

电容膜片真空计测量参考室与测量室之间的压强差. 如施加压力, 膜片即弯曲; 变形的程度与施加的压强直接有关. 两个极端情况示于图 2 中. 图 2(a) 表示膜片的全量程压强变形, 图 2(b) 表示膜片的“零”变形.

超过全量程压强, 膜片由传感器小室的上室支持, 产生良好的抗过压能力.

在零压强和全量程压强内的变形用固定的圆板在均匀的负载下来描述. 只要变形远小于膜片厚度, 变形与压强 p 成正比. 在膜片的中心, 膜片变形 w 可用下式计算:¹

$$\omega(p) = \frac{p \cdot r^4 \cdot 3 \cdot (1 - \nu^2)}{16 \cdot E \cdot t^3} \left[m = \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^4}{\text{Pa} \cdot \text{m}^3} \right], \quad (1)$$

其中 ν 为泊松比 (无单位), E 为杨氏模数, t 为膜片厚度, 和 r 为膜片的自由半径.

将全量程压强的典型变形调整至数微米, 仅数百微米膜厚的 1%. 它对压强的灵敏度因膜厚而变化.

在上室中央, 安置一个测量电极. 对向电极在膜片上. 由于压强变化产生的间距变化, 导致电容的变化,²

^{a)} 电子邮件: karl.jousten@ptb.de

^{b)} 电子邮件: simon.naef@inficon.com

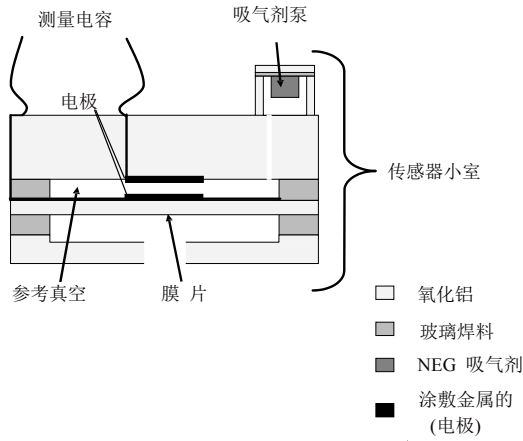


图 1. (彩色在线) INFICON 陶瓷膜片真空计的结构

$$\Delta C_{\text{meas}}(\omega) = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d_0 + \omega} - C_0 \left[F = \frac{As}{V} = \frac{As \cdot m^2}{Vm \cdot m} \right], \quad (2)$$

其中 d_0 是零压强下的间距, ϵ_0 是介电常数, A 是外壳电极的面积, C_{meas} 是产生的电容量变化, C_0 是零变形的电容。

电子学测量由于压强变化而产生的电容量变化和将原始讯号转换为线性 0–10 伏讯号输出。指示压强 p_{ind} 与在讯号输出电压 U 下的测量电压和全量程 FS 的关系表示于下式中³

$$p_{\text{ind}} (\text{帕}) = \frac{U (\text{伏}) \cdot \text{FS} (\text{帕})}{10.0 \text{ 伏}}. \quad (3)$$

除了热控制器和内部电源外, 电子学通过 5 个定义的步骤处理原始电容读值。第一步是电容测量, 它是基于 Σ - Δ 电容 / 电压变换器。第二步包含予刻度原始讯号。

线性化的反馈回路是第三步, 由于电容测量添加某些因间距至电容的双曲线关系形成的非线性 (见图 3)。

第四步是温度补偿。温度补偿应用于零 (零的温度效应) 和全量程 (全量程的温度效应)。最后, 输出级改变输出阻抗和包含全部对电磁兼容性和反极性的保护设备。

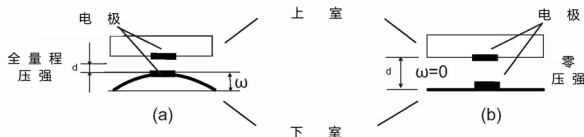


图 2 膜片弯曲示意图

测试的参考真空计为标准 45°C 热稳定陶瓷膜片真空计 (INFICON CDG045), 全量程从 13.3 帕高至 133 仟帕。

III. 校准

CDGs 在中和低真空下, 用氮作为测试气体与标准真空计每年在 PTB 进行校准。对于全量程高至 1.3 仟帕的 CDGs, 采用两种初级标准, 即 SE2 静态膨胀系统和 FRS5 压强平衡系统 (Furness 控制公司)。

在静态膨胀法系统中, 由从一个小容积膨胀已知量气体进入一个大得多的容积建立 SE2 压强。在如此系统中的压强可计算和与校准它的真空计指示值比较。^{4,5} SE2 覆盖的范围从 0.1 帕至 1.3 仟帕。

在 FRS5 压强平衡系统中, 压强的测量是作用在活塞上的力, 活塞的下侧处于高真空状态。⁷ 力的测量用测力计。FRS5 可精确地测量压强从 30 帕高至 11 仟帕,⁸ 但在本研究中, 使用的校准范围仅高至 1.3 仟帕。

在 1.3 仟帕以上, 采用 7010 石英波顿盘管压力计作为二级校准标准。7010 起源于 PTB 的水银压力计。⁹

CDGs 的电压输出 0–10 伏用校准的数字电压表测量。典型地, 一次同时校准 4 个 CDGs。用倍增器计电压值转换至压强单位毫巴 (1 毫巴 = 100 帕), 它是 1.33322 倍全刻度去除以 10。校准范围覆盖 3 个量级, 从 0.1% 至 100% 全量程, 其中靶点设定于 (0.1%, 0.5%, 1%, 5%, 10%, 和 20% 直到 100%)。

要确定的变量是读值误差 e 定义为

$$e = \frac{p_{\text{ind}} - p_{\text{cal}}}{p_{\text{cal}}}, \quad (4)$$

其中 p_{ind} 是如上所述 CDG 指示的压强和 p_{cal} 是初级标准定义的压强, 或二级标准 PTB 测量的压强。

四个在大气压条件下交货的全量程真空计。在再校准之间, 两个作为备用件的全量程真空计 CDGs 置于大气压条件的贮存柜中, 另外两个全量程真空计用于 INFICON 生产的校准工具。

由于经济原因, 一个测量系列仅用一个 CDG 校准。在重复性测量中添加了不确定性。一个全量程 1.3 仟帕 (10 仟) CDG 的校准曲线实例示于图 4 中。

与校准相关的不定性列举如下:

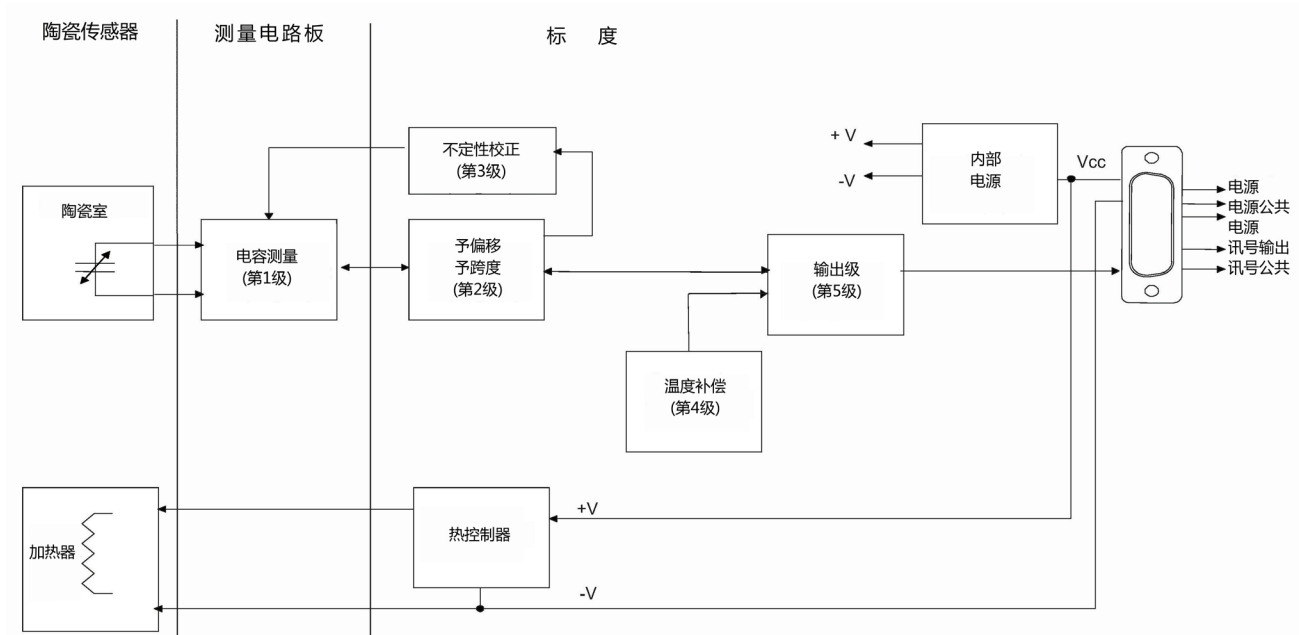


图 3. 加热陶瓷膜片真空计的电子学概念。

- (1) 初级标准的压强计算不定性, 或次级标准的测量不定性,
- (2) 测量的再现性, 和
- (3) 在校准下 CDG 的测量不定性.

计算压强的相对不定性 u 在初级标准中 SE2 范围从 0.094% (标准不定性, 覆盖区间 68%, $k=1$, k 被称为覆盖因素是标准不定性的倍数) 在 0.1 帕时, 至 0.074% 在 1.3 仟帕时. 对于 FRS5, 值的范围从 30 帕时的 $u = 0.072\%$ 至 1.3 仟帕的 0.0029%. 7010 的 u 在 1.4 仟帕的 0.019% 与 130 仟帕的 0.014% 之间.

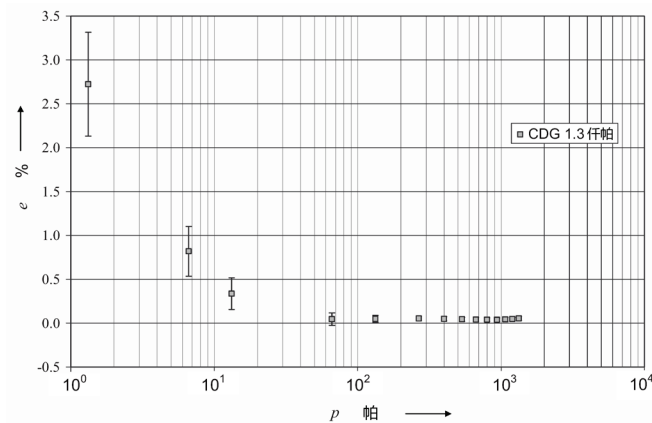


图 4. 全量程 1.3 仟帕的电容膜片真空计的校准曲线. e 是指示的相对误差. 低于 30 帕的校准用 PTB 的静态膨胀法系统, 压强 30 帕以上的校准采用压强平衡系统. 在高压强下, 不定性条图的 95% 置信区间小于符号的大小.

用 SE2 测量的再现性 ($k=1$) 被认为是 0.08% (压强 $p < 10$ 帕) 和 0.03% (压强 $p = 10$ 帕); 和用 7010 测量为 0.01% (压强 $p < 1.4$ 仟帕). 这些值在同一天用若干同类型的 CDGs 多次重复测量的估算结果. 再现性是参考标准与被校准设备两者的结果, 但在 SE2 的情况下, 主要为初级标准. 自从新建立的 FRS5 比 SE2 有更好的再现性, 执行如下节所述的新研究工作.

在校准过程中, 由于 CDG 本身的不定性主要是由于漂移和测量偏差. 典型地, 这相当于全量程读值的少数 10^5 部分和主导三个最低校准量级的总不定性. 数字电压表的数字化误差是不能忽略的.

IV. 再现性

为评价 1.3 仟帕 (10 毛) 全量程陶瓷 CDG 的再现性, 三个完全相同的设备 ($j=12, 22, 23$) 同时重复 (16 次, $l=1, \dots, 16$) 用 FRS5 在 30 帕和 1.2 仟帕下校准. 在每次测量之间, 抽空至压强低于设备的分辨限值. 在 3 小时内一次接一次地执行 16 次校准. 对于每个 CDG j , 平均误差读值 \bar{e}_j 和实验的标准偏差, 在下式中用于估算再现性:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{l=1}^{16} (e_{lj} - \bar{e}_j)^2}. \quad (5)$$

结果列于表 I 中. 在 30 帕时, 三个真空计的平均再现性为 0.027%, 它实际上与用 SE2 的相同, 然而, 在 1200 帕时, 它低得多, 为 0.004%.

表 1. 三个全量程 1.3 仟帕的陶瓷电容膜片真空计的 16 次对 FRS5 压强平衡系统在两个不同压强 $p = 30$ 和 1200 帕下的校准再现性. 再现性定义为公式 (5) 中.

p (帕)	设备 12 (%)	设备 22 (%)	设备 23 (%)	平均值 (%)
30	0.020	0.029	0.032	0.027
1200	0.0025	0.0016	0.0081	0.004

表 1 中的值包含 FRS5 和 CDGs 两者的再现性. 然而, 如若干真空计在相同时间校准, 可用统计模式区别 FRS5 参考标准和 CDGs 的再现性. 这是当前正在研究, 而结果将另作报告.

V. 长期稳定性

评估了全型号的近全量程 CDGs 的长期稳定性, 附加地评估了全量程 CDGs 在 5 帕下或低于 133 帕和在 7 帕下用于 1.3 仟帕全量程.

为量化长期不稳定性和年度重新校准, 我们采用下面两种方法:

- (1) 真空计的实验标准偏差 s 高于全时平均值 \bar{e}
- (2) 再校准间绝对 (非负数) 变化的平均值 $\bar{\Delta}$.

两个量值的定义为,

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}, \quad (6)$$

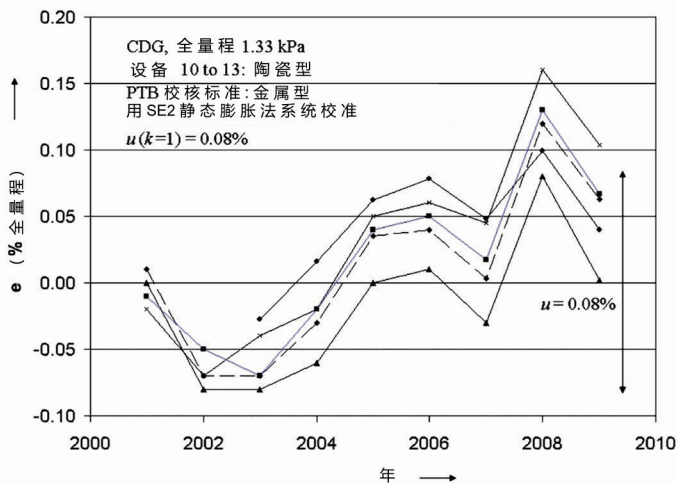


图 5. (彩色在线) 用 SE2 初级标准, 校准全量程 1.3 仟帕 CDGs, 8 年的全量程的读值误差. 标准测量不确定性 $u(k=1)$ 为 0.08%.

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |e_{i+1} - e_i|}{n-1}, \quad (7)$$

式中 e_i 是 i 年的读值误差, n 是年度再校准的总数.

当 n 不是太小和变化是纯随机时, 这两个数很相似. 连续若干年的系统性偏移加上随机的变更, $\bar{\Delta}$ 将小于 s .

再校准后明显地看到 (Fig. 5), 为直接评估全量程为 1.33 仟帕的测量设备, 用 SE2 静态膨胀法系统校准的不定性过高. 除了 INFICON 提供的四个陶瓷传感器外, 校准了 PTB 的校核标准, 它与 Inconel 型的 MKS 仪器公司生产的 CDG 有同样的全量程. 全部五个 CDGs 每年同时进行校准, 显示类似的年度性的系统性变化. 尽管年度性的系统性变化是在测量不定性的范围内, 它们提示 SE2 中产生的校准压强 p_{cal} 的共同效应. 由于这个原因, 用 SE2 校准来评估全量程 1.33 仟帕和低于这个值的 CDGs 的长期稳定性是一个更为复杂的问题.

在这情况下要评估长期稳定性, 必须区分初级标准与被校准的真空计指示的可能的年度偏移, 这两个效应之间的影响. 一般而言, 区别这两个效应是不可能的. 然而, 用四个真空计同时校准的情况下是可能评估的; 纵然这些真空计是同一类型的, 可预期它们真空计与真空计间的长期偏移是有差别的. 因此, 可假定全部真空计偏移的平均值归因于 p_{cal} , 可在它的不定性内变化, 单个真空计在平均值周围的分散可归因于特定的真空计. 因此, 我们用下式计算 i 年的全部读值误差的平均值 \bar{e}_i ,

表 II. 全量程 1.33 仟帕陶瓷 CDGs 明显的长期不稳定性, 靠近全量程的百分压强. 应用了第三列中不同的公式. 再校准周期为一年; 观察 9 年内的数据变化. 用 FRS5 作为标准的结果是基于仅四年的成功. 用 SE2 作为标准的各行, s 和 $\bar{\Delta}$ 用公式 (6) 和 (7) 计算, 包括标准的不定性, 不适宜用于特性化 CDG 的长期不稳定性.

标准	量值	公式	设备 10	设备 11	设备 12	设备 13	平均
SE2	s	Eq. (6)	0.062	0.062	0.051	0.074	0.062
	$\bar{\Delta}$	Eq. (7)	0.050	0.049	0.050	0.046	0.049
SE2	s_j	Eq. (12)	0.010	0.015	0.009	0.010	0.011
	$\bar{\delta}$	Eq. (13)	0.009	0.010	0.009	0.012	0.010
FRS5	s	Eq. (6)	0.009	0.005	0.009	0.012	0.009
	$\bar{\Delta}$	Eq. (7)	0.013	0.006	0.012	0.008	0.010

$$\bar{e}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e_{ij}, \tag{8}$$

式中 e_{ij} 是真空计 j 在 i 年中的读值误差和 N 为真空计的数量. 从 i 年至 $i+1$ 年, 偏移的平均值表示为

$$d_{i+1} = \bar{e}_{i+1} - \bar{e}_i, \tag{9}$$

对于单个真空计, 平均值表示为

$$\delta_{i+1,j} = e_{i+1,j} - e_{ij}. \tag{10}$$

如无真空计发生的分散,

$$\delta_{i+1,j} - d_{i+1} = 0 \text{ 全部 } j. \tag{11}$$

因此, 根均方偏移为

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (\delta_{i+1,j} - d_{i+1})^2} \tag{12}$$

给出校准的 CDG j 长期不稳定性的合理估值. 与式 (7) 相似, 我们还可观察整个再校准期间每年的平均变化量值.

$$\bar{\delta}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\delta_{i+1,j} - d_{i+1}|}{n-1}, \tag{13}$$

更严格的处理还需要考虑 d_i 的随机变化, 但由于我们仅感兴趣于粗的估算, 并已经进行了八次再校准, 因此, 这不是十分重要的.

表 II 表示分别按照公式 (6), (7), (12), 和 (13), 取得的结果. 当 SE2 装置的再现性约为 0.058% 时 (标准偏移 d_i) 是用公式 (12) 和 (13) 得到的, CDGs 的长期不稳定性更低和更为现实.

在 2006 年, 由于建立了 FRS5 压强平衡系统⁸, 实现压强量程高于 30 帕.

四个全量程 1.33 仟帕的 CDGs 除了用 SE2 外还用 FRS5 校准. 对于单个真空计观察到的年度至年度的变化降低了 5 倍, 对于全部四个真空计, 不再有明显的系统性变化 (图 6). 从这些校准的结果直接为 CDGs 的长期不稳定性给出现实性的值. 在全量程 1.33 仟帕的情况下, 它们应与以上计算的结果相似. 表 II 的最后两行表示情况恰是如此.

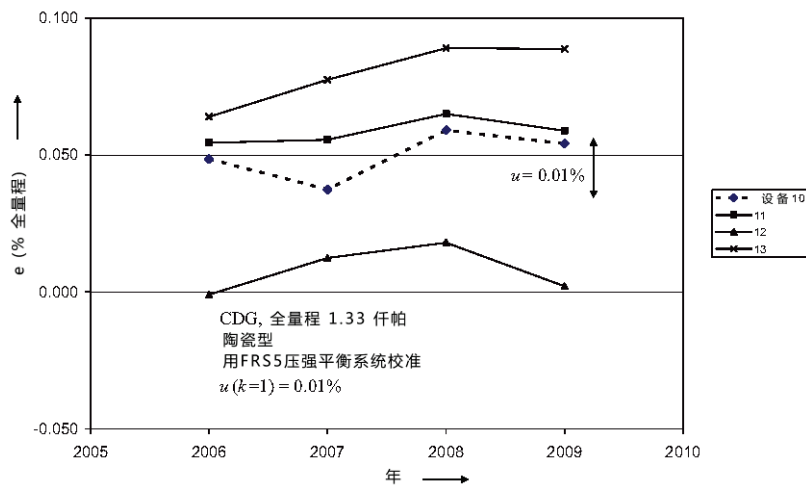


图 6. (彩色在线) 全量程 1.3 仟帕 CDGs, 4 年用 FRS5 压强平衡系统校准的全量程误差读值. 标准测量不定性 $u(k=1)$ 为 0.01%.

表 III. 全量程从 13 帕至 133 仟帕的陶瓷 CDGs 在靠近全量程的百分压强的长期不稳定性. 对于每个全量程, 给出四或五个设备的值 (总共为 21 个不同的设备). 长期不稳定性量的公式给出在第三列中. 再校准周期为一年; 数据观察在 9 年内. 133 仟帕全量程 CDGs 的结果基于仅四个成功年. 对于两个 133 仟帕的全量程陶瓷 CDGs (设备 3 和 4), 当再校准在 2 年中 (设备 20) 或 1 年中 (设备 21) 显示变化约为 1% 时数据可忽略.

FS	量值	公式	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4	设备 5	平均
13仟帕	s_j	Eq. (12)	0.040	0.038	0.021	0.042	0.041	0.036
	$\bar{\delta}$	Eq. (13)	0.037	0.029	0.014	0.033	0.031	0.029
FS	量值	公式	设备 6	设备 7	设备 8	设备 9	平均	
133仟帕	s_j	Eq. (12)	0.014	0.015	0.012	0.009	0.013	
	$\bar{\delta}$	Eq. (13)	0.009	0.011	0.009	0.008	0.009	
FS	量值	公式	设备 10	设备 11	设备 12	设备 13	平均	
1.33仟帕	s	Eq. (6)	0.009	0.005	0.009	0.012	0.009	
	$\bar{\Delta}$	Eq. (7)	0.013	0.006	0.012	0.008	0.010	
FS	量值	公式	设备 14	设备 15	设备 16	设备 17	平均	
13.3仟帕	s	Eq. (6)	0.009	0.011	0.015	0.016	0.013	
	$\bar{\Delta}$	Eq. (7)	0.007	0.008	0.010	0.011	0.009	
FS	量值	公式	设备 18	设备 19	设备 20	设备 21	平均	
133仟帕	s	Eq. (6)	0.006	0.017	0.040	0.015	0.019	
	$\bar{\Delta}$	Eq. (7)	0.005	0.021	0.026	0.010	0.016	

表 III 中分别汇总了 s [式 (6)] 和 $\bar{\Delta}$ [式 (7)] 或 s [式 (12)] 和 $\bar{\Delta}$ [式 (13)] 的观察值, 对于从 13 帕至 133 仟帕全量程 CDGs 观察长达 9 年, 由于上述原因, 1.33 仟帕全量程 CDGs 仅 4 个成功年用于数据库.

最低的长期不稳定性为 0.005% (有全量程 1.33 仟帕的设备 11 和有全量程 133 仟帕的设备 18). 对于 13 帕全量程 (设备 4) 的最高长期不稳定性为 0.042%.

四个陶瓷 CDGs 中的两个全量程 133 仟帕成功年度间的再校准, 6 年 (设备 20) 和 7 年 (设备 21) 后分别显示变化为 -1%.

这些数据在表 III 中被忽略. 这两设备有可进入的电位器用于全量程对错误的误调整进行纠正性调整. 两种设备均可再调整和再校准.

在表 IV 中, 表示全量程 13 和 133 帕的 CDGs, 在压强 5 帕下的 s 和 $\bar{\Delta}$ 值. 在 13 帕全量程的情况下, 这些值比全量程的真空计高 1.6 倍, 而在 133 帕的情况下约高 3.5 倍. 对于 133 帕全量程, 原因是由于漂移的偏离可变性, 和它的测量已影响 5 帕的值. 对于 1.33 仟帕全量程, 在压强 7 帕下的 s 和 $\bar{\Delta}$ 值也是真实的 (表 V), 其中 7 帕仅为全量程的 0.5%.

表 IV. 全量程从 13 帕至 133 仟帕的陶瓷 CDGs 在百分压强 5 帕下的长期不稳定性. s_j 和 $\bar{\Delta}$ 在式 (12) 和 (13) 中定义. 再校准周期为 1 年; 观察数据在 8 年 (13 帕) 或 9 年 (133 帕) 内.

全量程	量值	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4	设备 5	平均
13 帕	s_j	0.085	0.062	0.025	0.058	0.060	0.058
	$\bar{\delta}$	0.072	0.052	0.018	0.047	0.044	0.047
全量程	量值	设备 6	设备 7	设备 8	设备 9	平均	
133 帕	s_j	0.022	0.071	0.040	0.038	0.043	
	$\bar{\delta}$	0.020	0.057	0.030	0.030	0.034	

表 V. 全量程1.33 kPa仟帕的陶瓷 CDGs 在百分压强 7 帕下的长期不稳定性. s_j 和 $\bar{\Delta}$ 在式 (6) 和 (7) 中定义. 再校准周期为 1 年; 观察数据在 9 年内.

全量程	量值	设备 10	设备 11	设备 12	设备 13	平均
	s	0.124	0.097	0.131	0.098	0.113
1.33 仟帕	$\bar{\Delta}$	0.144	0.095	0.162	0.083	0.121

在这情况下, 式 (6), (12), (7), 和 (13), 分别地给出很小的值. 这表明初级标准在压强为 0.5% 全量程时未起到重要作用.

VI. 讨论

这是第一次研究陶瓷膜片 CDGs 长期稳定性的问题. 先前 Hyland 和 Tilford¹⁰发表了有关金属膜片 CDGs 长期稳定性的数据.^{10,11}作者发现对近全量程的再校准指示误差的变更, 对全量程 133 仟帕, 在 0.05% 与 0.86% 之间, 0.07%–0.24% (13.3 仟帕), 0.1%–1% (1.33 仟帕), 和 0.1%–2% (133 帕) 用 0.4 与 4.5 年之间的不等的再校准周期. 在 Grosse 和 Messer¹¹的研究中报告了若干气样相似的变更, 对 133 为 0.03%–0.25% 和对 1.33 仟帕为 0.09%–0.34%, 但每次试验仅有一个真空计.

这些金属 CDGs 的值指出其近全量程的长期不稳定性高于陶瓷 CDGs. 这也是 PTB 真空计量实验室长期为客户校准的经验. 由于在许多情况下, 长期不稳定性对 CDGs 的测量和校准是主导的不定性, PTB 将在近期发表有关金属 CDGs 的数据. 尽管陶瓷 CDGs 有较好的近全量程长期稳定性, 然而, 必须指出, 金属膜片 CDGs 的高分辨率精度低于 1% 全量程, 明显的好于陶瓷膜片 CDGs.

与谐振硅真空计¹²相比, 当压强低于 1.3 仟帕时, 陶瓷 CDGs 的长期偏移高 3 倍, 压强高于 100 仟帕时, 高 10 – 100 倍. 与 CDGs 和静态膨胀系统相似, 谐振硅真空计看来是如此稳定, 在 100 仟帕下, 它们真实的长期不稳定性不能用高级的水银初级标准来确定.

VII. 结论

陶瓷 CDGs 技术已达到相当的成熟, 长期不稳定性在 0.01% – 0.02% 内 (全量程 ≥ 133 帕), 是如此低, 以致静态膨胀法系统初级标准的不定性过高, 从而不能直接地观察真实的长期不稳定性. 近全量程的陶瓷 CDGs 被推荐用作为很稳定的传递标准. 然而, 必须指出, 这里用于测试的 CDGs 经过贮存, 运输, 和用于相对纯的条件下, 周围为大气压空气或氮气作为测试气体. 本研究的结果不代表将 CDGs 用于污染的过程环境.

致谢

衷心地感谢 PTB 的 Christian Buchmann 和 Marco Schulz 两位仔细地采集数据, 与 PTB 的 Clemens Elster 和 INFICON 的 Per Björkman 两位有益的讨论.

¹M. Elwenspoek and R. Wiegerink, *Mechanical Microsensors* (Springer, Berlin, 2001), pp. 59–97.

²L. K. Baxter, *Capacitive Sensors* (IEEE, Piscataway, NJ, 1997), Chap. 4, p. 6.

³INFICON, Operating Manual CDG045D (tina51e1) 13, INFICON, Balzers (2008), p. 13.

⁴W. Jitschin, J. K. Migwi, and G. Grosse, *Vacuum* **40**, 293 (1990).

⁵*Handbook of Vacuum Technology*, edited by K. Jousten (Wiley, Weinheim, 2008), Chap. 15, p. 698.

⁶A. P. Müller, M. Bergoglio, N. Bignell, K. M. K. Fen, S. S. Hong, K. Jousten, P. Mohan, F. J. Redgrave, and M. Sardi *Metrologia* **39**, 07001 (2002).

⁷C. G. Rendle and H. Rosenberg, *Metrologia* **36**, 613 (1999).

⁸Th. Bock, H. Ahrendt, and K. Jousten, *Metrologia* **46**, 389 (2009).

⁹J. Jäger, *Metrologia* **30**, 553 (1994).

¹⁰R. W. Hyland and C. R. Tilford, *J. Vac. Sci. Technol. A* **3**, 1731 (1985).

¹¹G. Grosse and G. Messer, *J. Vac. Sci. Technol. A* **5**, 2463 (1987).

¹²J. H. Hendricks and A. P. Müller, *Metrologia* **44**, 171 (2007).