

数字式微压活塞

北京德朗电子技术开发有限公司 岑月琴 王瑞科

摘要: DPG1 是 DPG 系列数字式活塞压力计中的一个型号, 其设计目标是采用活塞压力计原理, 解决微小绝压、表压和差压的校准。本文简要介绍了 DPG1 数字式微压气体活塞压力计的原理、结构、技术特点和校准方法。

关键词: 微小压力, 数字式活塞压力计, 精密电子天平, 活塞组件

一、引言

在现实生活和工业中, 很多地方用到微小压力测量, 如半导体工业、制药工业、航空航天、冶炼等。针对这种需求, 很多厂家投入大量资金和人力开发出了多种微压传感器和变送器, 并得到了广泛的应用。然而, 长期以来, 微小绝压、差压和表压的校准问题却没有得到很好的解决, 尽管有高精度 U 型管微压基准, 如: 超声波干涉 U 型管微压计, 激光干涉 U 型管微压计等, 但由于系统过于复杂, 维护比较困难, 很难得到推广和普及。

在压力计量领域, 活塞式压力计以其优良的不确定度, 稳定的压力控制性, 长期以来使其成为定义(除微小压力)压力和建标的首要选择。为此, 很多从事压力基、标准研究和制造的单位和个人, 一直试图降低活塞压力计的测量范围。由于活塞研磨工艺的制约, 始终未能实现。

在这期间, 曾经设计有球面型活塞(如 AMETEK 和西安仪表厂的浮球式压力计)和楔型活塞, 其中楔

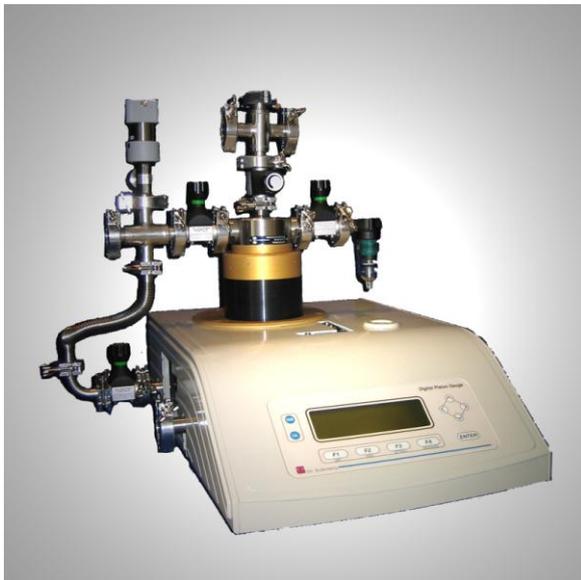


图 1 DPG1 微小压力气体活塞

型活塞又分为活塞筒锥面(DHI 的 FPG8601)和活塞杆锥面(GE-DRUCK 的 V1600D)。这些设计可以实现小压力的测量, 但不是严格意义上的活塞压力计, 不能向基本量溯源。同时它们也有其自身的缺点, 如: 耗气量大, 压力测量腔和参考压力腔内有较大的气体流和压强梯度, 压力平衡为动态平衡, 尤其在微小压力, 实现可重复的高精度测量是不可能的。

DH 作为具有 150 多年压力标准生产经验的老牌公司, 凭借精湛的活塞研磨工艺背景, 设计完成了 DPG1 微压气体活塞压力计, 从而使 DPG 系列活塞的测量范围延伸到了微小压力。活塞组件采用标准的圆柱结构, 具有近于完美的几何特性, 其圆度、直线度和平行度小于 0.1μ , 活塞间隙小于 0.4μ , 由于活塞间隙极小, 流过间隙的气体几乎为零, 不会在参考腔和测量端造成压强梯度和压力不稳定, 因此, 具有无可比拟的灵敏度、和重复性。

DPG1 的不确定度优于 $0.02\text{Pa}+2*10^{-5}P$, 最小可测压力依赖于真空系统, 采用 Edwards RV-5 旋片式真空泵做为参考腔和测量端真空泵, 参考真空可达 0.05Pa , 最小测量压力为 0.5Pa 。而采用分子泵, 最小测量压力低于 0.1Pa 。DPG1 外观图见[图 1]。

二、工作原理

DPG1 微压气体活塞压力计的测压原理和一般活塞压力计一样, 是直接以物理学上压力的定义公式: $P=F/A$ 为基础的。在活塞压力计中[图 2], 已知有效面积的圆柱型活塞在活塞筒中垂直的自由旋转, 作用在活塞底端的压力和活塞另一端所加砝码的重力平衡, 因此, 活塞压力计的测压原理使压力可以和基本物理量质量 (kg)、长

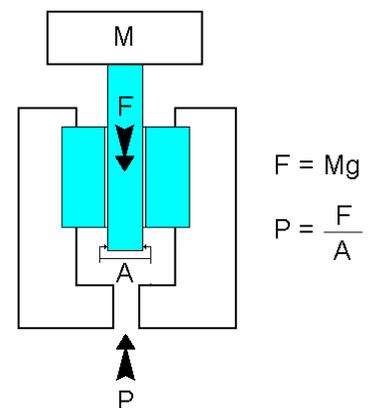


图 2 一般活塞压力计原理

度 (m) 和时间 (s) 直接联系起来, 这就是活塞压力计可以用来建立高等级压力标准的原因。

至于 DPG1 微压活塞[图 3], 同样包含一组已知有效面积的标准活塞组件, 所不同的是, 它不是用砝码测量活塞另一端所加的压力, 而是采用质量传递链中的天平环节, 用精密电子天平测量压力作用在活塞上产生的力, DPG1 活塞压力计底座内的标准砝码自动校准精密电子天平。其测压步骤如下:

- 1) 内部标准砝码自动校准精密电子天平。
- 2) 压力经活塞转化为力, 作用在精密电子天平上。
- 3) 精密电子天平测得力值。
- 4) 微型计算机根据压力计算公式算出压力值, 送显示器显示, 同时送接口供计算机读取。

DPG1 的活塞组件和传统活塞的不同之处在于在活塞筒的中间部位开一导压孔, 一个比参考腔压力高出 40kPa 的恒定压力由此导入活塞间隙, 在活塞间隙两端形成压力差, 对于理想几何形状的活塞, 活塞杆和活塞筒之间的间隙内流动的气体为层流, 在中立面, 层之间的相对流速为零, 层之间没有摩擦力, 从而使活塞杆自由地在活塞筒内运动。

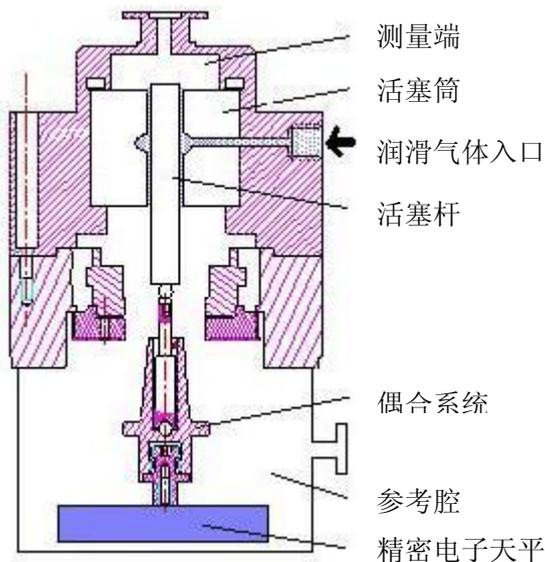


图 3 DPG1 原理图

DPG1 活塞组件的优点是:

- 1)、传统活塞之所以不能做小微压测量, 因为活塞间隙两端压力差过小, 不能形成稳定的层流, 通过活塞筒中间导入压力, 可在间隙中形成有效的层流。
- 2)、活塞组件为理想柱面结构, 几何偏差小于 0.1μ , 可排除非柱面结构带来的垂直方向的力。
- 3)、活塞间隙小于 0.4μ , 通过活塞间隙流入参考腔和测量端的介质很少, 不会在参考腔和测量端引起压强梯度。

4)、活塞组件为理想柱面结构, 现有成熟的活塞理论适用于 DPG1 的活塞组件, 可由几何尺寸测量直接得到活塞的有效面积。因此, DPG1 为独立的压力基准。

5)、活塞组件可方便的从测量头中取出, 安装在其它活塞压力计上, 由常规气体活塞压力计检定, 方便的得到有效面积。而不是采用常规气体活塞压力计量程的低端, 这样可大大降低 DPG1 活塞有效面积的不确定度。提高 DPG1 的性能指标。

三、组 成

DPG1 数字式微压气体活塞由活塞系统、测量头、精密电子天平及内部标准砝码和自校准系统、微计算机系统组成[图 4]。其中精密电子天平、环境测量模块、内部标准砝码和自校准系统安装在数字活塞底座中, 活塞和活塞转动驱动部件等安装在测量头中。另外还包括阀门、管路和压力控制器等辅助设备和附件。DPG1 数字式微压气体活塞的计量性能取决于它的子系统。

3. 1 活塞系统

活塞系统是数字活塞的核心部件, 它的作用是把压力转化为力, 其转换水平主要受活塞加工质量的影响。DH 的活塞组件采用一种特殊的碳化钨材料、按照自己独特的加工工艺完成, 圆度、直线度和平行度小于 $0.1\mu\text{m}$, 活塞间隙介于 $0.2\mu\text{m}\sim 0.6\mu\text{m}$ 之间, 灵敏度小于 0.01Pa , 年稳定性 1ppm 。DH 共为数字活塞压力计制造有 22 种活塞组件, 直径从 1.5mm 直到 35mm, DPG5 可选其中的 16 种, DPG8 可选其中的 3 种, DPG1 可选其中的 3 种。

3. 2 测量头

测量头的作用是安装活塞、保护活塞并操作活塞工作。每个测量头内部装有一组活塞组件, 活塞转动驱动系统、四线铂电阻温度计等部件。

活塞转动驱动系统使活塞垂直地在活塞筒中央旋转, 保证力垂直地作用在精密电子天平上。四线铂电阻温度计用以精密测量活塞温度, 修整温度对活塞有效面积的影响。作为一体化的测量部件, 测量头独立于数字活塞底座。每个测量头具有一个固定的量程, DH 共为 DPG1 生产 3 个品种的测量头, 它们可共用一个底座。因此, 用户在购买 DPG1 数字微压气体活塞时, 可根据自己测量的需要, 选购多个测量头, 这些测量头共用一个底座。测量头通过快速插接耦合系统与精密电子天平连接, 更换测量头仅需几秒钟。

3. 3 精密电子天平

精密电子天平由天平专业生产厂家梅特勒-托利多专门为数字活塞定制加工, 采用磁杯技术, 可以自动校准。一块内部标准砝码作为校准标准。因此, 在数字活塞中, 精密电子天平不是作为力测量

仪器使用，而是作为力比较器，比较标准砝码产生的已知力和压力作用在活塞上产生的力。数字式活塞压力计使用的是精密电子天平的短期稳定性。

3. 4 微计算机系统

微计算机系统有四个方面的作用：1) 通过温度、湿度和气压传感器测量活塞温度、模拟环境条件；2) 控制完成自动校准；3) 存储活塞组件、工作现场的参数，根据压力公式计算压力；4) 提供友好的人机界面，可通过面板操作，也可通过 RS232C 接口和计算机连接起来，通过计算机操作。

3. 5 辅助设备

参见附图：DPG1 完全配置图。

3. 5. 1 参考真空部分

包括真空泵、DPG1 参考真空腔接口、参考腔隔离阀①、测量头真空隔离阀③、真空腔残余真空调节阀②和真空计。用户根据需要可选用 Edwards 公司的 RV-5 旋片式真空泵 (0.05Pa) 或 RV-5 加分子泵 (10⁻³Pa)，DPG1 有两个真空腔接口，一个接真空泵，另一个接真空计，阀①和③打开时，活塞测量端和参考腔同时接到参考真空泵，这样，可对 DPG1 校零。阀②可把参考真空调节到任何真空值，用于差压校准。

3. 5. 2 测量部分

测量部分包括：自动压力调节器⑩、稳压容积⑨、测试端口⑥、测量头隔离阀④、通大气阀⑤以及大气过滤器。自动压力调节器包括 Edwards 公司的 RV-3 旋片式真空泵一台，它可在 20 秒内控制稳定的微压输出，测试端口可接被检的真空计或微压计，通大气阀⑤可在完成校准工作后，使系统两端通大气。

3. 5. 3 润滑气源

包括一台压力调节器⑦，设定的压力输出比参考腔搞出 35kPa，当 DPG1 做绝压测量时，还需一台 RV-3 旋片式真空泵一台。压力调节器⑧只有在做静压高过大气压的差压校准时才需要。

四、压力计算公式

DPG1 数字式微压气体活塞压力计直接由压力定义公式导出压力，压力为作用在面积上的力和面积的比率：

$$P = \frac{F}{A}$$

F 为力，A 为活塞组件的有效面积。

DPG 系列数字式活塞压力计定义的压力可用下式表示：

$$P = \frac{\frac{N}{N_k} \times g \times \left(\frac{\rho_{al} - \rho_m}{\rho_{an} - \rho_m} \right)}{A_0 [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(t - 20^\circ\text{C})] (1 + \lambda P)}$$

A₀ 为活塞在零压力和 20°C 下的有效面积；

[1 + (α_p + α_c)(t - 20°C)] 项为活塞组件的温度修正

项，其中 α_p 和 α_c 由活塞筒和活塞材料决定，活塞组件温度 t 由安装在测量头中的四线铂电阻温度计测得；(1 + λP) 项为活塞组件的压力形变修正项，λ 为

压力形变系数，由理论或实验可以得到。

$\frac{N}{N_k} \times g \times \left(\frac{\rho_{al} - \rho_m}{\rho_{an} - \rho_m} \right)$ 项为精密电子天平测得的力，

其中 N_k 为精密电子天平的灵敏度，物理定义为每千

克砝码引起的天平输出； $\left(\frac{\rho_{al} - \rho_m}{\rho_{an} - \rho_m} \right)$ 为空气浮力修

正项，ρ_{al} 为当地空气密度，由数字活塞底座中集成的传感器测得，ρ_m 为数字活塞内标准砝码的密度 (7900kg/m³)，ρ_{an} 为标准大气密度 (1.2kg/m³)；g 为当地重力加速度；N 为压力通过活塞转化为力作用在电子天平上，电子天平的输出。

五、技术性能及特点

DPG1 微压气体活塞实现了活塞压力计的数字化，它与活塞压力计和数字压力计相比，有着优越的性能。

5. 1 与活塞压力计相比

- ★ 不用搬动砝码的高精度压力测量设备
- ★ 实时测量并显示压力值，做校准比一般活塞压力计更方便
- ★ 压力显示有 12 个压力单位和一个用户自定义单位供选择
- ★ 压力测量从零点开始
- ★ 具有两个 RS232C 接口，其中一个可接其它设备，另一个接计算机
- ★ 与 DH 公司生产的 GPC 压力控制器一起，组成全自动压力校准系统
- ★ 在绝压测量时，整个校准过程不中断参考真空，大大缩短了检定时间，校准一点仅需数秒钟。
- ★ 内置标准电阻，可自校准活塞温度测量电路

5. 2 与一般的数字式压力计相比

- ★ 具有数字压力计不可比拟的精度 (0.0015%FS) 和长期稳定性 (2ppm/年)

- ★ 可以用于认证实验室建标
- ★ 电子部分可自动校准,长期稳定性仅决定于碳化钨活塞组件和标准砝码
- ★ 直接由力和面积定义压力
- ★ 真正的数字压力测量,没有 A/D 转换
- ★ 量程变换仅需数秒钟
- ★ 具有自动校准功能,可选内部自动校准和外部自动校准

六、DPG1 的校准

我们知道,传统活塞压力计的校准包括质量校准(砝码组的校准)和活塞有效面积的校准,DPG1 也一样包括:质量校准(精密电子天平的校准)和活塞有效面积的校准。

6.1 精密电子天平的校准

DPG1 的精密电子天平,其校准方法和质量实验室的精密电子天平一样,取下测量头,把随机带的承重盘及标准砝码顺序放在电子天平上,共有五块砝码,不确定度为 5ppm。见图 4。

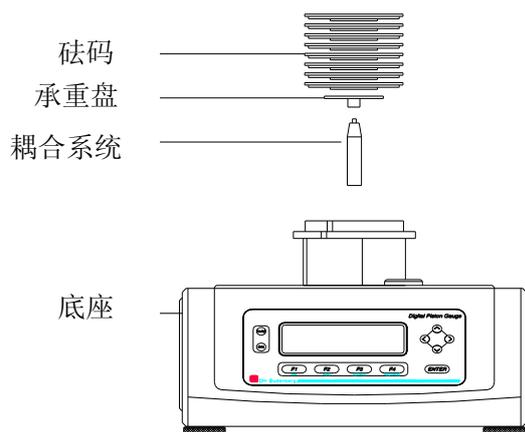


图 4 精密电子天平校准

6.2 活塞有效面积的校准

DPG1 的活塞组件安装在测量头中,可以方便的取出,以确定有效面积。共有三种方法获得 DPG1 活塞组件的有效面积——直接几何尺寸测量法、气压基准溯源法和压力平衡法。

6.2.1 直接几何尺寸测量

由于 DPG1 的活塞组件和传统的活塞一样,为理想的圆柱体,因此,可以通过激光干涉测长法测得活塞杆和活塞筒的直径,通过计算获得有效面积,这样确定的有效面积的不确定度可达 3ppm。目前,发达国家的基准活塞压力计均采用该方法得到有效面积。

6.2.2 气压基准溯源

目前,气压基准共有两种——汞液体基准和气体活塞基准,汞液体基准的不确定度可达 3ppm,气体活塞基准的不确定度大 5ppm,如 DH 公司的 APX50 全自动气体活塞压力计。DPG1 活塞组件的有效面积可由气压基准检定获得,这和一般活塞检定一样,把 DPG1 活塞组件安装在一般活塞的底座上,或通过转换头安装在其它厂家的底座上,然后和基准活塞压力计连接起来,在基准活塞的全量程范围内取压力平衡点而不是仅用基准活塞的下限,这样,可充分利用气压基准的优势量程范围,决定 DPG1 活塞组件的有效面积,取得更好的不确定度。如果采用 APX50 校准 DPG1,由于 APX50 的有效面积不确定度为 3ppm,DPG1 的面积不确定度可达到 6ppm。

6.2.3 压力平衡

在完成 DPG1 的精密电子天平校准后,把测量头连同内部的活塞组件安装在 DPG1 底座上,然后和气压基准连接,在气压基准量程的低端,由气压基准给出标准的压力,DPG1 设置为显示力值,根据力值、标准压力值,代入上页的压力公式,即可得到活塞的有效面积。

结束语

DPG 系列数字式活塞压力计把活塞压力计的优越计量性能和数字压力计的使用灵活方便有机地结合了起来,向世界展示了一种全新的压力标准。这种设计思想源于上个世纪七十年代,并于八十年代初设计完成。由于运用了全新的设计理念和特殊的制造工艺,使得数字式活塞继承了传统活塞的低不确定度和长期稳定性,又拥有数字压力校准器的使用方便、压力显示数字化、与计算机进行数据交换的优点,测量实现了模块化,一台活塞底座可以配有多个活塞组,实现极宽压力范围的测量,而且还可以进行绝压、表压和负压校准。数字活塞以其极高的精度、优良的长期稳定性、测压迅速、使用方便赢得了广泛的信赖。到目前为止, DH 公司已向全世界提供了近两千台数字活塞压力计,广泛使用在标准实验室、仪器仪表研发机构、压力仪器生产厂,用于校准高精度压力控制器、数字压力计、压力变送器、气压计、大气数据计算机等压力仪器仪表;也可用于认证实验室建标。

DPG1 作为 DPG 系列的一个型号,压力覆盖了微压段,它即可以做小微压绝压、表压校准,也可以做静压在 0-200kPa 的差压校准。其定义的不确定度优于: $0.02\text{Pa} + 20\text{ppm}$ 。

附件一:

