

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.02.03

微压测量和校准技术分析与发展趋势

闫继超, 李鑫武, 彭轶

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 在高精度装备仪器的研制、试验和生产中, 微压测量是一项重要且基础的测量技术。本文通过介绍微压测量在实际生产中的广泛应用, 凸显出重视微压测量的必要性; 通过对目前微压校准仪器的现状与发展趋势的分析和介绍, 对未来微压校准的发展进行了展望。

关键词: 微压; 测量; 校准; 发展趋势

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)02-0011-04

Technical Analysis and Development Trend of Micro Pressure Measurement and Calibration

YAN Jichao, LI Xinwu, PENG Yi

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Micro pressure measurement is an important and basic measurement technology in the development, test and production of high-precision equipment in modern science and technology field. This paper introduces the wide application of micro pressure measurement in practice, highlighting the necessity of emphasizing micro pressure measurement. Through the introduction and analysis of the present situation and development trend of micro pressure calibration instruments, the development of micro pressure calibration in the future is forecasted.

Key words: micro pressure; measurement; calibration; development trend

0 引言

随着国防及民用工业生产研制的迅速发展, 对微小压力测量和校准的需求和技术要求越来越高, 微压测量和校准的准确度、可靠性对于提高仪器装备的研制和生产的质量, 影响越来越大。基于此, 本文将较全面的介绍微压测量和校准技术。

1 微压测量的实际应用

微压测量技术应用十分广泛, 下面举例介绍微压测量技术在国防及民用工业生产中的实际应用。

1) 发动机测试中的应用

航空发动机全流程参数测量是发动机研制阶段的重要环节, 是全面了解发动机性能并提高其性能的唯一手段, 而压力参数是其中一个很重要的参数, 需要测量各特征截面的压力参数, 如图 1 所示, 试车间环

境压力、发动机进气道的压力等微小压力在几千帕以内。另外, 为了获得飞行器气动特性的数据, 提高飞行器的气动性能, 使飞行器状态稳定, 需要在风洞试验中测量气流参数(压力参数也是其中重要的气流参数), 并要求准确测量各测量点的微小压力分布, 目前, 一般采用压力传感器组成的测压系统, 或多通道压力扫描阀组成的电子扫描压力测量系统测量这些微小压力。



图 1 发动机试车台测试

收稿日期: 2017-03-13

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2015205A009)

作者简介: 闫继超(1988-), 男, 助理工程师, 主要从事压力计量及测试工作。

2) 药品生产中的应用

在传统制药领域, 药品 GMP 认证中, 要求洁净区与非洁净区之间、不同级别洁净区之间应保持一定的差压, 相同洁净度级别不同功能的操作间之间应保持适当的差压梯度, 产尘操作间应保持相对负压, 以防止污染和交叉污染。这些差压一般在几十帕斯卡以内, 这就要求对空调与通风系统进行微小压力的精确测量如图 2 所示, 保障制药密封间对环境的严格控制。



图 2 制药厂空调密封间

除上述外, 还有很多不同领域需要对微压力进行测量。载人飞行器舱体的检漏排查就用到了微压检漏的方法, 这些微差压一般在几千帕以内; 载人飞行器环境监控系统、人体生理参数监控系统需要监测 100 Pa 左右的舱压; 航空器和导弹的姿态控制对微压力的测量需求; 某些特殊材料的加工工艺中, 尤其是复合材料加工方面要对几千帕以下微小压力进行测量, 也需要微小差压测量。

2 微压校准的现状

目前, 存在着多种微压校准方式, 微压校准仪器设备也多种多样, 主要有以下几种微压校准仪器。

2.1 补偿式微压计

国内普遍使用的微压标准是补偿式微压计, 如图 3, 主要用于 2.5 kPa 以下微压压力的量传, 分为一等和二等两个等级, 一等最大允许误差为 $\pm 0.4 \sim \pm 0.5$ Pa, 二等最大允许误差为 $\pm 0.8 \sim \pm 1.3$ Pa。补偿式微压计是以 $P = \rho gh$ 为定义公式的液体压力计, 并采用补偿式的原理, 即通过 U 型管可动容器位移变化来补偿被测压力所引起的 U 型管固定容器中液位零点的变化, 并通过测量可动容器的位移量而得到被测压力。

首先, 由于补偿式微压计研制年代较早, 其固定容器中的液位采用金属定位物在水面反射的影象来进行光学定位, 通过人眼识别影象读数, 识别结果往往



图 3 补偿式微压计

具有很大的不确定性; 其次, 可动容器的位移测量采用定值的量块测量, 并通过读数千分尺来读数, 因此, 所产生的压力是固定的离散点, 不能进行量程范围内的连续测量; 再次, 由于水的密度受环境因素影响很大, 而补偿式微压计没有进行实时的温度和大气压修正, 这就无可避免的增加了较大的误差。

尽管补偿式微压计的技术指标具有较好的长期稳定性, 一直是我国微压段量值的复现及传递不可取代的微压标准, 但随着微压仪表的准确度需求不断提高, 现有补偿式微压计的准确度已无法满足高准确度校准的需求, 再加上目前的补偿式微压计测量范围主要覆盖 2.5 kPa 以下, 在更宽范围的微压校准中使用补偿式微压计显得力不从心。

2.2 活塞式压力计

活塞式压力计以 $P = mg/S$ 为定义公式, 其稳定性和溯源性比较好, 是目前常规量程范围内普遍采用的压力标准装置。但活塞式压力计测量下限有一定的死区, 且测量下限是由活塞杆自身和承重盘及连接件的质量所决定, 一般情况下死区不可避免。长久以来, 科研人员都在致力于降低活塞压力计的测量下限, 以便更好地用活塞压力计进行微压测量。常用方法是通过降低活塞杆和承重盘的材料密度来实现, 但为了保证活塞系统稳定, 要考虑压力形变、温度形变、工作介质表面张力等因素, 可供选择的活塞系统材料有一定限制。图 4 采用非金属陶瓷材料活塞, 其下限仍很难进一步降低。同时为了保证活塞的转动延续时间、下降速度、鉴别力等指标, 使其能正常稳定的输出标准压力值, 其测量范围下限也不能进一步降低。基于以上因素, 使得活塞式压力计的实际工作测量范围下限一般在 5 kPa 左右, 不能与补偿式微压计测量范围上限相衔接, 所以传统的活塞式压力计在微压测量时存在局限性, 无法满足微压量值的校准需求。

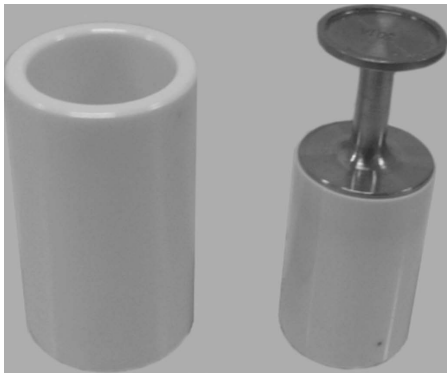


图4 陶瓷材料的活塞系统

2.3 数字式微压计

数字压力计具有读数直观，携带方便等优点，是目前使用频率越来越高的微压校准仪器，尤其是在现场微压校准中。由于微压压力信号非常小，极易受到环境变化的干扰，所以对微压传感器生产制造的技术和工艺要求较高；由于数字压力仪表的稳定性及准确度有一定局限性，所以数字式微压计还不能作为稳定可靠的微压标准来进行高准确度校准，一般作为传递标准进行使用。

3 微压校准的发展趋势

3.1 微压液体压力计的发展趋势

虽然目前的补偿式微压计的准确度有一定局限性，但稳定性好是其最大优点，因此，目前有很多国内、外实验室在其设计原理的基础上加以改良和完善。

通过上述对补偿式微压计的分析可以了解到其固定容器液面定位和可动容器的位移测量准确度有一定局限性，因此，提高其性能的关键是如何提高液面定位和位移测量准确度。

随着激光干涉技术的迅速发展，现在长度量值的测量和校准很多都采用激光干涉技术，例如线纹尺、量块、精密丝杠的检测，高精度检测仪器及大规模集成电路设备的定位、机械矫正，进行微小尺寸的测量等。超声波定位技术在医疗、塑胶产品的熔接、电子产品的焊接、金属探伤、工件清洗等领域的使用也非常成功。

国内、外一些计量技术机构将激光测长技术和超声定位技术应用到微压校准中，大幅度提高微压校准的准确度水平。NIST 和中国计量院的微压计量标准，均采用液体压力计的工作原理，如图 5，运用到了超声波定位技术及激光干涉测长技术。NIST 所具备的微压标准技术情况如表 1 所示。

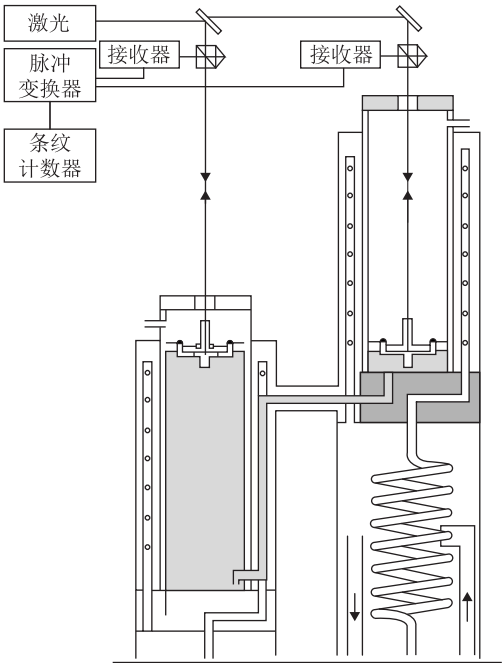


图5 液体压力计原理图

表 1 NIST 微压标准技术指标 Pa

测量范围	不确定度
0.1~4	4~10000
0.0021~0.0076(<i>k</i> = 2)	0.006~0.07(<i>k</i> = 2)

这类液体压力计实际上仍然是以 $P=\rho gh$ 为定义公式的补偿式微压计，其工作原理为：当无压力进入液体压力标准时，超声波定位系统会记录下图 5 左边固定容器液位的高度，此液位高度为初始定位高度。当被测压力进入左端固定容器，固定容器液位会因压力进入而发生变化，此时超声定位系统会测量出水位变化量。与此同时计算机给出信号使丝杠旋转，带动右端可动容器上下移动，通过可动容器的移动，使固定容器液位始终保持在初始定位高度不变，此时再应用激光干涉仪测出右端可动容器的位移量，再根据方程 $p=\rho gh$ 并考虑相关修正，计算出被测压力值大小。为提高测量准确度，一般给液体压力计标准提供稳定可靠的恒温环境，并通过铂电阻温度计和大气压力计对温度和环境大气压进行实时测量和修正，以达到更优的测量结果。

3.2 微压活塞式压力计的发展趋势

为克服传统活塞式压力计测量微小压力时的不足，微压活塞式压力计在不断的改良与研发。美国 DHI 公司研制了 PG8601 力平衡式微压活塞式压力计，如图 6 所示，采用独特的力平衡结构设计，有效的解决了活塞的死区问题，使测量范围下限低至 10 Pa，进一步减

小了微小压力范围内的测量不确定度, 达到 $0.003\% \pm 0.005 \text{ Pa}$ 。



图 6 微压活塞式压力计实物图

微压活塞式压力计工作原理如图 7 所示。作用到活塞有效面积上的压力并不像传统活塞式压力计一样由重力加速度 g 乘以砝码质量 m 所得, 而是由高精度的力平衡压力传感器实测得出。活塞缸套顶部和底部安装了压力室, 常态压力状态下调整上下压力室压力, 从而使压力传感器值为零, 这样可以剔除活塞的重量以及其它非所测压力的压力因素, 降低了实际工作测量下限, 使测量压力基本从零开始。之后, 再依据基本公式 $P=F/S$ 由压力传感器所测得的实际净压力值和活塞有效面积计算出差值。

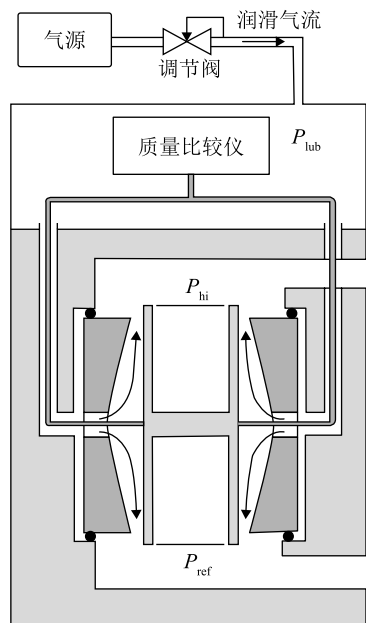


图 7 微压活塞式压力计原理图

超声干涉液体压力计和微压活塞式压力计在微压校准技术领域处于世界领先水平, 是未来微压校准发展的主要方向。

3.3 微压自动标准压力发生器的发展趋势

除上述介绍外, 微压自动标准压力发生器是在高

精度压力传感器技术进步的基础上发展起来的。由压力发生源、压力控制装置、高精度的压力传感器、通讯接收接口、数据采集部分等几部分配合组成。它的突出优点是操作简单、体积小、重量轻, 便于进行现场测量校准。这类仪器采用传感器温度补偿技术, 使微压传感器的工作温度范围有大幅度增加, 并提高了测量的准确性。其控制方法一般通过改变密闭容积内气体的体积来实现改变输出压力的大小, 对压力进行实时测量并显示, 具有不需要外部提供起源等优点, 在控制微小的压力时, 有更高、更稳定的准确度。目前气体介质的数字微压传递标准的最大允许误差可达 $0.01\% \text{ FS}$, 技术指标如表 2 所示。

表 2 微压传递标准列举

生产商	型号	量程/kPa	最大允许误差
Mensor	CPC6000	2.5	$0.01\% \text{ FS}$ $\pm 0.25 \text{ Pa}$
DHI	PPC4	15	$0.008\% \text{ FS}$ $\pm 1.2 \text{ Pa}$
GE	7250 LP	2.5~25	$0.005\% \text{ FS}$ $\pm 0.125 \sim \pm 1.25 \text{ Pa}$

4 结束语

随着微压测量的应用越来越广泛, 压力传感技术、微压力控制技术的发展, 高准确度的微压产品将大量涌现, 解决这些微压仪器仪表的溯源问题, 是现在和未来很长一段时间, 必须面临的难题。目前我国在微压标准这一领域还有待发展, 如何在现有的超声定位、激光测长、压力控制技术等相关知识储备的基础上, 发展更高准确度的微压标准装置, 将会成为今后研究的重点方向。

参考文献

- [1] 王金库, 李燕华, 悦进. 补偿式标准微压计使用中的高度差修正分析[J]. 计量技术, 2009(1): 52-53. doi: 10.3969/j. issn. 1000-0771. 2009. 01. 017.
- [2] 胡央丽. 补偿式微压计的常见问题解析[J]. 计测技术, 2009, 29(B09): 78, 80.
- [3] Sutton C M, Fitzgerald M P, Jack D G. Conventional pressure balances as reference standards for pressures in the range 10 Pa to 10 kPa[J]. Metrologia, 1999, 36(6): 517.
- [4] 孙跃. 浅谈压力计量测试技术的发展[J]. 科技创新与应用, 2012, 39(10): 79-80.
- [5] 顾红卫. 高精度超声波微压差测量仪设计[J]. 电子工程师, 2007, 33(8): 19-21, 60.