

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.11

高静压差压校准方法分析比较

李群, 李鑫武

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 高静压差压测量的准确度、可靠性对于提高压力测量装置研制质量有很大影响。本文介绍了差压传感器基本原理及其校准过程中存在的主要问题, 分析比较了几种高静压差压校准方法, 重点介绍了双活塞方式差压校准及分压方式高静压差压校准方法, 并结合试验数据对高静压差压传感器静压影响进行了分析。

关键词: 差压传感器; 高静压; 静压影响

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2016) 03-0044-04

Analysis of Calibration Method for Differential Pressure at High Static Pressure

LI Qun, LI Xinwu

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

Abstract: The accuracy and reliability of differential pressure at high static pressure have great influence on the development quality of pressure measuring device. This paper mainly describes fundamentals of differential pressure transducer and problems in the process of its calibration, and analyses several calibration methods for differential pressure at high static line pressures, especially introduces dual piston model and divider model. Based on experimental data, it analyses the influence of static pressure on differential pressure transducer.

Key words: differential pressure transducer; high static pressure; influence of static pressure

0 引言

差压测量是一项重要的、基础性测量技术, 随着科研生产对差压测量需求的不断增加, 对其技术要求也越来越高。研究发现一些差压测量具有一个共同的特点: 测量不是在没有压力(大气压)的状态下进行, 而是要求在高静压状态下测量差压。例如发动机系统及发动机试车台燃油流量和空气流量的测量, 均是在几兆帕至十几兆帕的静压下测得差压, 并根据差压和流量之间的换算关系, 将所测差压信号转化为流量信号。又如在航空发动机防喘系统中, 大多采用喘振差压传感器对压气机出口气流高静压与差压进行实时监测, 并由机载计算机控制产生一系列动作来防止发动机喘振的产生。

差压测量在物料的液位、容积、密度、质量及各种检漏密封性试验等方面的测量中也有广泛的应用,

尤其是受压容器的液位测量, 例如航天工业中低温推进剂储罐的液位测量, 其通过测量储罐液面处气枕压力(静压)和底部压力之差(差压), 再根据压差与液位之间的关系确定液位, 通过这种方法也可以将差压转化为容积、密度、质量等参数的测量。

高静压差压的测量多采用各种差压传感器(变送器、数字计)进行测量, 为了保证高静压差压量值的准确可靠, 需要对高静压差压传感器进行校准, 这就对高静压差压校准提出了更新更高的要求。

1 差压传感器简介

差压传感器是将一个空间用压力敏感元件(多用膜片)分割成高、低压两个腔室, 如图1所示, 当压差经由高压导管和低压导管分别导入高低压腔室时, 传感器膜片在两方压力共同作用下产生位移(或位移的趋势), 该位移量和两个腔室压力差成正比^[1], 并将位移量传导至测量元件上, 测量元件将测得的差压信号转换为与之对应的电信号传递给转换器, 经过放大等处理变为可用电信号输出。

收稿日期: 2016-03-21

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(JSJC2013205C209)

作者简介: 李群(1984-), 女, 工程师, 从事压力计量科研工作。

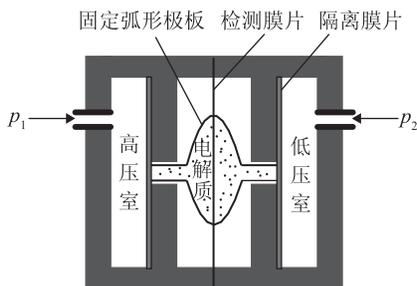


图1 差压传感器结构示意图

差压传感器发展至今已有电容式传感器、扩散硅压阻式传感器、差动电感式传感器、石英谐振式传感器和陶瓷电容式传感器等不同类型^[2]，目前应用最多的是电容式传感器和扩散硅压阻式传感器。随着技术发展，将会研制出更多新型的差压传感器用于差压测量。

2 差压传感器校准中主要问题分析

差压传感器在静压下改变输出的主要原因是取压部分的机械变形。在高静压条件下，虽然传感器铸件壳体和灌充在膜盒中的硅油变形都非常小，但是由于仪表的灵敏度太高，且两测量室不可能制造得完全对称，因此由高静压引起的变化仍然是比较显著的。这种影响主要体现在差压传感器的静压误差指标上，即差压仪表的静压变化对其差压输出的影响，该影响主要表现在零点输出和灵敏度输出变化等方面。

国外的研究机构曾对差压传感器的静压误差进行过一些科学试验和总结。例如：由Sira（英国）、TNO（挪威）和LNE（法国）历经5年对从14个主要制造厂取得的16台差压变送器样品进行了独立评估，得到的结果为：6台仪表未能满足制造厂关于静压影响的规定指标；2台仪表没有静压影响指标，在规定的静压最大值情况下，其量程的变化是其规定校准误差的4倍；13台仪表显著受到静压的影响，即静压的影响远大于仪表的校准指标^[3]。

由于差压仪表在不同静压下表现出不同的性能，且差别十分显著，所以差压仪表在高静压下的计量校准十分关键，直接关系到差压仪表的测量准确性。

3 高静压差压校准方法

高静压差压校准一直是世界性的难题。对其研究并不是十分系统和全面，再加上在计量领域内充分认识高静压差压校准技术重要性的时间比较短，所以在世界范围内高静压差压校准装置的制造和应用并不普及，差压仪表的校准方法也非常有限。

3.1 低压端通大气方式差压校准

由于差压校准设备普及率低，大多数的差压测量仪表是在低压端通大气的情况下校准，这种方法只适用于低静压差压（微差压）仪表的校准，因为其静压的影响远低于仪表的准确度指标。大多数使用差压测量仪表的场合均包含了作用在仪表高、低压两端口的一定值的静压，通过对差压仪表性能和国外试验数据的分析，由于差压仪表在静压状态下会产生输出值的静压误差，所以这种忽略静压误差的方法，只能保证静压为零的状态差压校准的准确度，无法保证实际工作状态（静压不为零，尤其是高静压状态）差压校准的准确度和可信度，因此这种方法存在很大的问题。

3.2 双通道数字压力仪表方式差压校准

双通道数字压力仪表方式差压校准方法通过将差压仪表高低压端口分别与数字压力仪表相互独立的两个通道相连，通过手动或自动控制，使高低压端口压力值达到差压仪表的静压要求，这时隔离高低压端口压力，再利用数字压力仪表其中一个压力通道在高压端控制压力，使其达到标准差压压力值，来达到校准差压仪表的目的。双通道数字压力仪表方式差压校准方法主要是通过双通道压力控制器来实现。

此方法也只适用于低静压差压仪表的校准，因为其最大的问题是数字压力仪表在满足高静压的同时，必然会降低校准差压的准确度和分辨力。另外，因为数字压力仪表的稳定性及准确度有一定限制，所以利用数字压力仪表的方法不能作为校准高静压差压仪表的常用方法使用。

3.3 双活塞方式差压校准

双活塞式高静压差压校准装置是目前准确度等级最高的高静压差压校准装置，也是目前应用最好的高静压差压标准，国外的一些实验室如韩国的KRIS、日本的NIMJ等压力校准实验室所研制的差压校准装置均选用这种方式^[4-5]。

双活塞方式高静压差压校准装置由测量活塞（包括静、差压专用砝码）、平衡活塞（包括静压砝码）以及压力控制系统和环境检测系统组成，装置组成示意图见图2。两套活塞压力计系统设计制作在一个底座上，中间用隔离装置连接起来。首先通过压力控制系统平稳对校准装置进行预加压及粗调，并采用起始静压平衡方法使两活塞在相同静压值下浮起并处于工作位置，待活塞旋转平稳后，关闭连接高低压管路两端的平衡阀，并在测量活塞上（高压端）加放需要产生差压值 Δp 的专用砝码，然后压力控制系统对高压端管

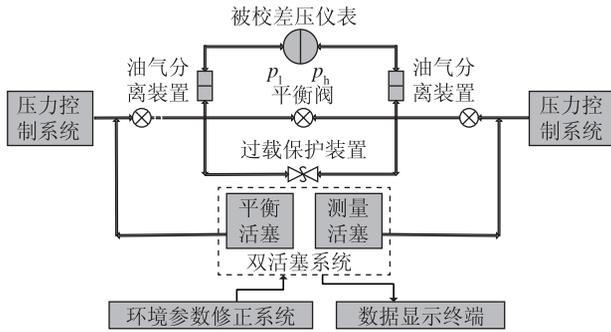


图2 双活塞方式高静压差压校准装置组成框图

路压力进行控制，使其达到预定的差压值。校准过程中差压值可根据公式(1)得出，有

$$\Delta p = \frac{\Delta m \times g}{A'} + \rho g \Delta h \quad (1)$$

式中： Δp 为标准差压值； Δm 为测量活塞上静压平衡后，所加的差压专用砝码质量； A' 为测量活塞在差压测量时的活塞有效面积，包含温度及压力形变等修正； ρ 为工作介质的密度； Δh 为测量活塞和被校差压仪表参考位置高度差。

该方法设计原理简单、易于实现，但是需要合理设计压力系统的整体布局及结构，以尽量降低由于结构原因而引起的对差压测量的影响。

3.4 分压方式高静压差压校准技术

分压方式产生高静压差压的核心是同轴三活塞设计，采用同轴三活塞大面积差压活塞的原理，利用大小面积活塞产生压力的关系，将所加压力差分为更小的差压。

我所研制的高静压差压校准装置选择分压方式产生高静压差压，其原理如图3所示，分压装置两输出端分别与与被校差压仪表高低压两端相连，通过压力控制系统加压，该压力通过分压装置施加到被校差压设

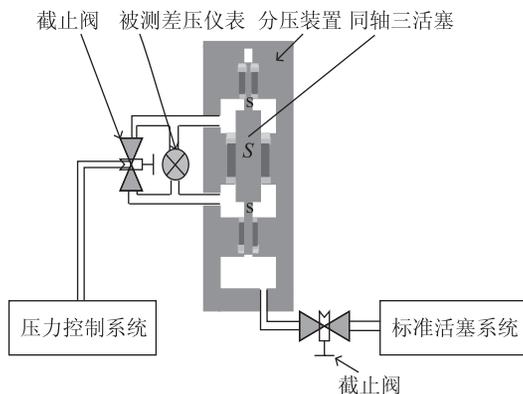


图3 利用分压方式产生高静压差压原理图

备高低压两端，当达到设定静压时，使测试口与压力控制系统断开，将分压装置下端与标准活塞连通，在标准活塞上施加所需差压砝码，并调整标准活塞使其处于工作位置，实现当前静压条件下差压的校准。

校准过程中的差压值可根据同轴三活塞面积比例计算得出。三组同轴活塞，上、下活塞面积相等，中间活塞的面积是上、下活塞的倍数，设为 M [2]。分压装置有两个腔体，腔内被导入静压后由阀门分离，要使分压装置上方腔体与下方腔体之间产生差压 Δp ，由此增加的向下的附加力为 $(S - s) \Delta p$ ，要使活塞平衡，必须在下端活塞底部增加压力 p ，使 $s \times p = (S - s) \Delta p$ ，则

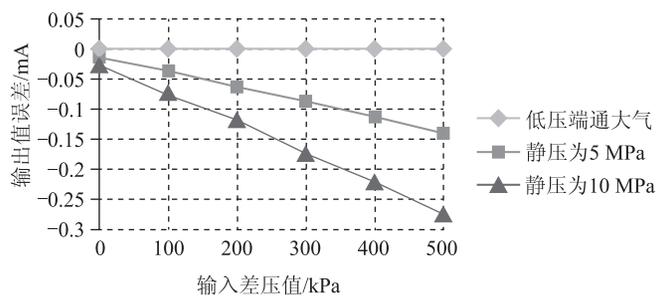
$$p = \frac{S - s}{s} \times \Delta p \quad (2)$$

因此，需要在标准活塞上加上能产生压力值 p 的砝码，来得到差压 Δp 。从公式(2)可知，分压装置能提供的差压量程由同轴三活塞大小活塞的面积比 M 确定，因此，通过合理设计活塞的面积比例，可以实现不同范围的差压测量。

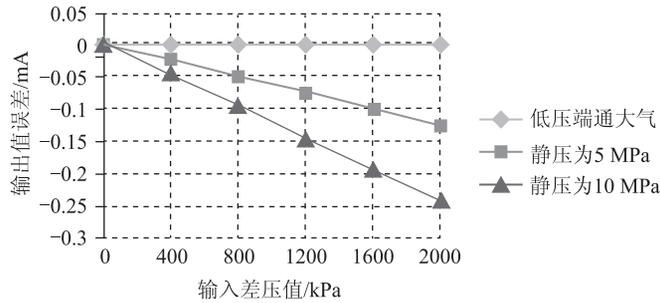
分压方式校准技术对分压装置及活塞系统的加工要求很高，三个活塞的轴心偏差要求很小，但是该方法操作简单方便，提高了质量到压力转换的分辨力，并且稳定性好，随着科技水平的发展，有很好的应用前景。

4 试验分析

基于上述分析，选择某厂家生产的差压范围为 0~500 kPa 和 0~2000 kPa，最大工作静压均为 17.3 MPa 的两台差压传感器为试验对象，采用我所研制的高静压差压校准装置作为标准器，在不同静压条件下，对差压传感器施加差压并测得其输出值，将输出值与理论输出值比较，得到三种不同静压条件下输出值误差如图4(a)、图4(b)所示。



(a) 0~500 kPa差压变送器测量结果比较



(b) 0~2000 kPa差压变送器测量结果比较

图4 静压对差压变送器输出值影响

从试验数据看出：在静压不同的条件下，相同差压点，传感器示值存在较大差别，该静压影响主要跟差压传感器的类型和结构原理有关。另外，差压值在不同静压下的影响仍需要进行大量的实验分析，以进一步确定静压对差压仪表性能的影响。

5 结语

目前，越来越多领域应用到差压测量，为保证仪表的精确测量，对差压传感器的静压影响必须予以重视。国内外对高静压差压校准技术的研究也越来越多，

主要集中在对差压传感器静压影响的研究以及高准确度静压差压活塞的研制等方面，通过对该技术与相关应用，可以改进目前校准差压仪表不科学合理的现状，提高对各类差压仪表的校准测试水平，进而为相关科研生产项目提供更有利的保障。

参考文献

- [1] 杜水友, 孙筱云, 竺惠敏. 压力测量技术及仪表 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 曹秀敏. 差压变送器的应用和发展 [J]. 山西电力技术, 2001 (2): 63-64.
- [3] 中国百科网. 静压对校验差压变送器影响程度的评估 [EB/OL]. [2013-07-23]. <http://m.chinabaike.com/t/35273/2013/0723/1321344.html>.
- [4] S. Woo, I. Choi, H. Song, B. Kim. New differential pressure standard at KRISS [C] //IMEKO TC3, TC16 and TC22 International Conference. Merida, Mexico: IMEKO, 2007.
- [5] M. Kojima, K. Saitou and T. Kobata. Study on calibration procedure for differential pressure transducers [C] //IMEKO TC3, TC16 and TC22 International Conference. Merida, Mexico: IMEKO, 2007.
- [6] 中国计量测试学会. 压力测量不确定度评定 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2006.

(上接第 21 页)

3) 偏心补偿误差引入的不确定度

该项误差是指测微准直望远镜的转动中心相对于转台的转动中心的位置偏差，在整个圆周上误差分布为正弦分布。利用测角不确定度为 1.0" 的转台进行偏心误差补偿，则偏心补偿误差可估计为

$$u_3 = 1.0''/\sqrt{2} \approx 0.71''$$

4) 望远镜本体定向测量误差引入的不确定度

依据光轴与机械轴的不平行度 3"，取均匀分布，则引入的测量不确定度

$$u_4 = 3''/\sqrt{3} \approx 1.8''$$

则合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 2.1''$$

扩展不确定度 $U = 4.2'' (k=2)$

5 结论

由测量系统的不确定度分析可以看出，本文设计的带有自标定的数字准直瞄准测量系统的定位测量不确定度可达到 $0.034 \text{ mm} + 5.8 \times 10^{-3} L (k=2)$ ，其定位测量

能力与激光跟踪仪相当；定向测量不确定度可达到 $4.2'' (k=2)$ ，其测角能力与高精度的电子经纬仪相当。这表明该系统完全满足高精度空间定位定向测量的需求，可用于风洞天平静校台的校准、发动机传动轴的轴体装配及大尺寸对测角和定位要求较高的场合。

参考文献

- [1] 中航工业陕西华燕航空仪表有限公司. CZW 测微准直望远镜操作手册 [Z]. 2011.
- [2] Martinelli P, Musazzi S, Perini U. An autocollimator based optical system for precise angular alignment control over large exploring aresa [J]. Rev. Sci. Instrum., 1994, 65 (4): 1012-1014.
- [3] 赵莹. 光学自准直比较测角仪的数字化测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [4] 蒋有年. 关于测微准直望远镜等光学仪器瞄准误差的探讨 [J]. 航空工艺技术, 1982 (3): 38-4.
- [5] 大连光程光电科技有限公司. CZW-D 测微准直望远镜电子目镜简介 [EB/OL]. [2016-01-18]. <http://dlguangcheng.cn.china.cn/>.
- [6] 欧同庚、陈志高, 杨博雄, 等. CCD 光电自准直仪工作原理及误差源分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27 (6): 98-100.