doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2020.02.27

微压力标准装置研制

李鑫武
（航空工业北京长城计量测试技术研究所，北京 100095）

摘　要：详细介绍了一种液体压力计微压标准装置的研制，采用超声波液位定位技术实现液位准确定位，并采用激光干涉技术实现了液柱高度准确测量，同时对温度控制、位移控制、数据采集处理等分系统设计进行介绍，最后对微压标准装置进行了测量不确定度分析和验证，该标准装置填补国防系统 5 kPa 以下微压量值传递空白，解决国防系统高准确度微压仪器仪表的溯源问题。

关键词：微压力；校准；压力标准装置；液体压力计
中图分类号：TB935　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674－5795(2020)02－0178－05

Design Development of Micro Pressure Standard Device

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

Abstract: This paper introduces in detail the development of a micro pressure standard device for liquid pressure gauge. Using ultrasonic liquid level positioning technology to realize accurate liquid level positioning. The height of liquid column is accurately measured by laser interference technology. At the same time, the temperature control, displacement control, data acquisition and processing subsystem design are introduced. Finally, the measurement uncertainty of the micro pressure standard device is analyzed and verified. The standard device fills the gap of below 5kPa micro pressure value transmission in national defense system, and solves the traceability problem of high accuracy micro pressure instruments in national defense system.

Key words: micro pressure; calibration; pressure standard device; liquid manometer

0　引言

微压测量是指几千帕以内的微小表压力的测量，广泛应用于航空、制药、工业生产等各领域。例如：在航空领域中，测量发动机各特征截面的压力参数；测量飞行器机翼、机身等表面微小压力分布状态；在民用制药领域，对空调与通风系统进行微小压力的精确测量，从而保障制药密封间对环境的严格控制。除上述外，还有很多不同领域需要应用对微压力进行测量。随着国防以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也越来越高。[1]

目前采用的微压标准一般为补偿式微压计，一等补偿式微压计的测量范围一般是 ±2.5 kPa，最大允许误差为 ±0.4 ~ ±0.5 Pa。补偿式微压计是以 $P=\rho gh$ 定义的液体压力计。其采用光学定位和读数千分尺来测量高度，通过人眼进行读数，所以误差比较大[2]，但由于其稳定性好，现阶段仍是主要使用的微压标准。针对补偿式微压计固定容器液面定位和可动容器的位移测量准确度的局限，国内外一些技术机构将激光测长技术用于可动容器的位移测量，提高微压校准的准确度水平。另外，广泛采用的活塞式压力计标准，其定义公式为 $P=mg/A$，可溯源至基本量[3]，稳定性好，但由于活塞自重的限制使其存在死区，虽然有一些活塞采用非金属陶瓷材料，可以一定程度降低测量范围下限，但下限一般只能到 5 kPa 左右。为克服测量微压时的不足，一些国外机构采用力平衡式结构的微压活塞式压力计，用力平衡传感器测量并平衡作用在到活塞上的压力，这样可以剔除活塞的自身重量，使测量范围下限可以低至 10 Pa。

以上对液体压力计和活塞式压力计的改进方案是国内外微压标准研制的主流方向，本文采用液体压力计方式进行微压标准设计，研制测量范围为 ±5 kPa 的液体微压标准，填补目前补偿式微压计上限 2.5 kPa 与活塞式压力计下限 5 kPa 之间存在的量值传递空白，并进一步降低测量不确定度。

1　微压标准装置设计

微压标准装置是基于液体压力计设计的，主要由基座平台、超声液位测量系统、激光位移测量系统、位移控制系统、温度控制系统和数据采集处理系统等部分组成[4]，如图 1 所示。

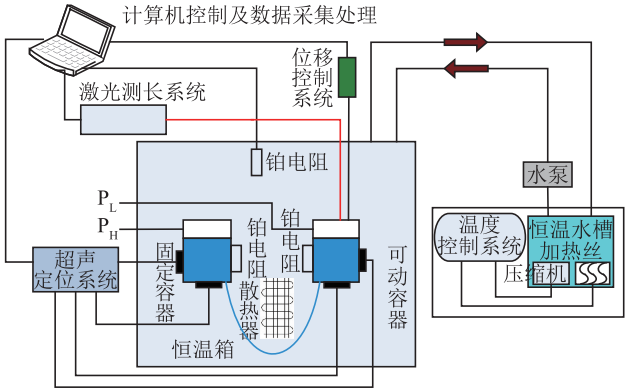

图 1　微压标准系统组成图

基座平台是微压标准的工作平台，用于固定各分系统，使他们拥有统一的工作平面；超声液位测量系统包含固定容器和可动容器，用于盛放工作介质，连通后构成一端可移动的液体压力计，并可以测量确定固定容器和可动容器的液面初始值及变化量；激光位移测量系统用于测量可动容器的垂直移动距离，以确定液柱的高度；位移控制系统用于控制可动容器的垂直移动；温度控制系统为给整个装置提供稳定的温度环境，并实时测量温度值；数据采集处理系统实现了对大气压力、超声液位、激光位移、温度控制等系统的数据采集和处理，同时实现位移和限位器的控制。

微压标准装置的工作原理是采用补偿式原理的液体压力计，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 型管固定容器中液体零点的变化，并通过测量可动容器的位移量而得到被测压力，其定义公式为

$$p = (\rho - \rho_0)g(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \qquad (1)$$

式中：p 为被测压力，Pa；h_1 为可动容器的位移变化，m；h_2 为固定容器的液位变化修正量，m；h_3 为可动容器的液位变化修正量，m；h_4 为丝杠垂直度修正量，m；ρ 为工作介质密度，kg/m^3；ρ_0 为环境空气密度，kg/m^3；g 为重力加速度，m/s^2。

1.1　微压标准基座平台设计

微压标准主体基座平台结构设计可以采用支撑型和悬挂型两种结构，均需要一个大理石平台放置激光干涉仪，不同的是支撑型将固定容器和可动容器固定于地面平面，与激光干涉仪为不同平面，悬挂型将固定容器和可动容器同时固定于大理石平台，与激光干涉仪为相同平面，具体结构如图 2 所示。

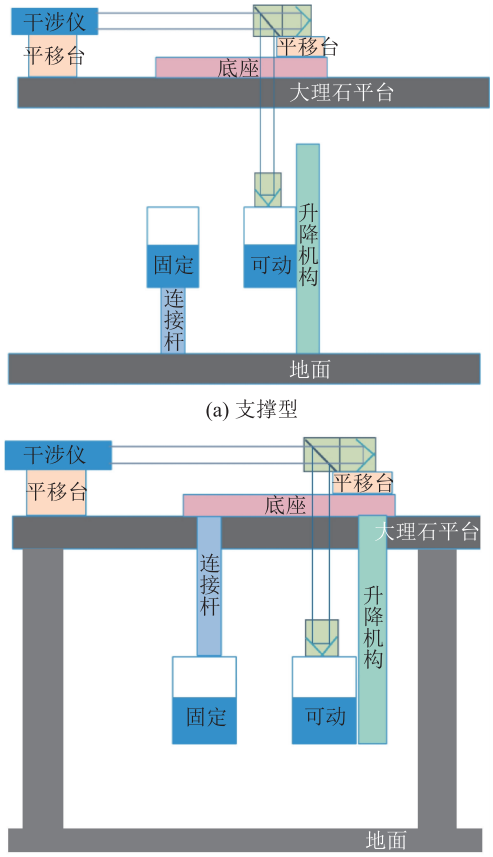

图 2　主体基座平台结构图

支撑型结构安装相对容易，但是受震动的影响大，需要考虑地基隔震；悬挂型结构安装相对复杂，但是受震动的影响小，因为所有部件都以大理石底座为基准，与大理石底座的运动相同，这就消除了震动等带来部件之间相对运动的影响。

1.2　激光位移测量系统设计

激光干涉仪放在精密位移平台上，同时能够进行 X，Y 和 Z 方向三维调整控制，便于光路调节。组合镜固定在一起，防止相对位移造成的误差，组合镜置于光学镜组位移平台上，可以进行 X 和 Y 方向整控制。棱镜固定于压力容器上方，工作时，压力容器随位移控制系统控制进行垂直运动，经棱镜反射回来的光干涉条纹发生变化，光电元件接收干涉条纹并将其转换为电脉冲信号整形放大，通过计数器对干涉条纹计数而得到可动容器的位移距离。激光测距系统多维度调整机构，包含激光器位移平台和光学镜组位移平台两部分，用于微压标准激光测距系统光路的调节和控制，

系统如图 3 所示。

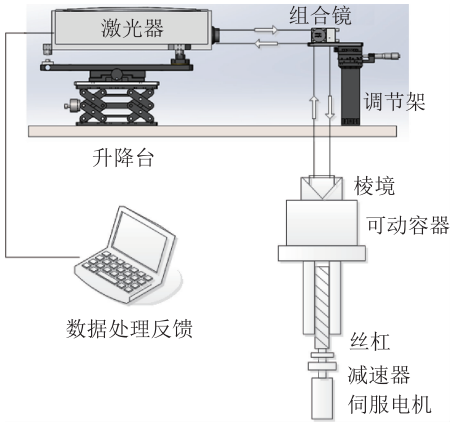

图 3　激光位移测量系统原理图

其中干涉仪位移平台可以实现 X 方向、Y 方向和 Z 方向三维调整控制，通过对水平位移、水平方向 θ 角、竖直方向俯仰进行控制，实现激光器多方向、多角度自由控制。光学镜组位移平台可以实现 X 方向和 Y 方向两维调整控制。激光位移测量系统测量误差可达到 ±0.5 μm，满足设计要求。

1.3　超声液位测量系统设计

超声液位测量系统是通过测量超声波在液体介质中从发射到接收所需要的声时来测量液面高度，由于超声波在液体介质中的声速随温湿度、大气压等环境条件而改变[4]，所以在测量时有一定难度，因此设计了特殊的容器结构。在标准管和测量管的底部分别安装着超声换能器，如图 4 所示。在容器的结构设计中，理论上测量管直径越大越好，可以减小表面张力的影响，也可以减小波动影响，但直径过大会使系统过于笨重，通过尝试不同的直径以及具体的实验，最终确定了相对合理的结构和尺寸。

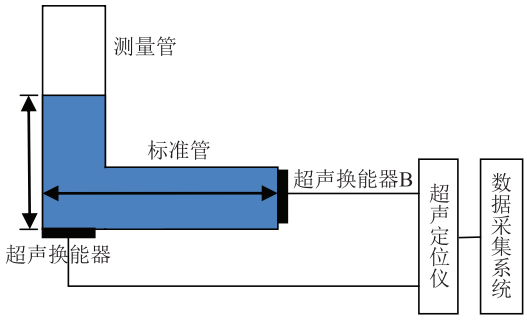

图 4　超声液位测量系统原理图

超声声速通过标准管进行测量，由于标准管长度已知(可测量获得)，则超声声速通过标准管中从发射到接收所需的声时来确定，公式为

$$v = \frac{2L_0}{T_0} \tag{2}$$

式中：v 为超声波在液体中的声速，m/s；L_0 为标准管的长度，m；T_0 为标准管超声波从发射到接收的声时，s。

由于标准管和测量管为同一容器，这种结构能够充分保证标准管和测量管温场的均匀和一致，即认为声速一致，则测量管中液位高度为

$$H = T \cdot \frac{L_0}{T_0} \tag{3}$$

式中：H 为测量管的液面高度，m；T 为测量管超声波从发射到接收的声时，s。

通过以上分析，要想准确测量液位高度，只需准确测量两个超声声时(T_0 和 T)。超声声时测量原理如图 5 所示，发射探头在发超声波的同时给时数转换电路一个触发信号，触发时数转换电路开始计时，当接收探头接收到超声波信号后进入时数转换电路，经放大器进入信号比较器，由信号比较器给出计时停止信号，得到超声波从发射端到接收端的准确时间[5]。

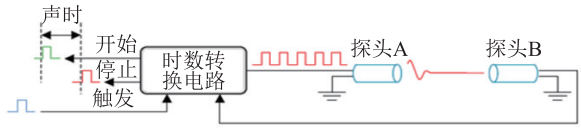

图 5　声时测量原理图

超声声时的测量主要采用脉冲计数法，其原理如图 6 所示。超声液位测量系统高度测量稳定性达到 3 μm/2 h，满足设计要求。

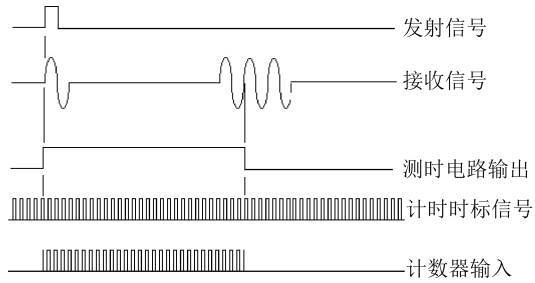

图 6　声时测量脉冲计数法示意图

1.4　位移控制系统设计

位移控制系统主要包括调节水平板、固定板及肋板、丝杠、滑轨、电机、联轴器及各种连接器件等部分。考虑到微压的易受影响性，位移控制系统的设计要满足运动平稳、效率高、噪声小的要求，因此位移控制系统采用滚珠丝杠和谐波减速器作为传动部件、伺服电机作为动力部件。电机通过联轴器与丝杠联接，在可动容器通过连接件和螺母与丝杠联接，通过计算机输出的控制信号来控制电机的运动及方向，带动可

动容器进行垂直运动。调节水平板用于固定所有部件，并可进行水平调节。固定板及肋板用于加强固定整套系统。可动容器位移的上下限安装了限位开关，防止可动容器和丝杠因误操作而损坏。如图 7 所示。位移控制系统的功能是将可动容器移动到目标高度，以实现压力值的调整。

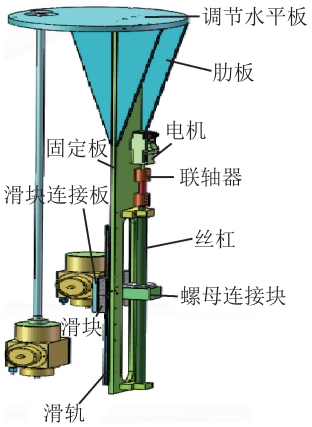

图 7　位移控制系统设计图

通过设计选型，丝杠的总长度为 700 mm，减去两端安装连接及限位开关的安装，有效距离为 513.98 mm，满足设计要求。电机作用于丝杠带动螺母运动时产生向上的力为 452 N，大于作用于螺母上的重力(由螺母自重、连接法兰、滑块、可动容器及工作介质组成)，满足设计要求。通过电机控制实验，控制信号实现位移分辨率可达到 0.04 mm，满足设计要求。

1.5　温度控制系统设计

恒温箱主体由恒温槽和恒温箱两部分组成，如图 8 所示，这种分离式设计可将恒温槽和恒温箱放置在两个房间，避免恒温槽长时间加热和制冷对恒温箱的影响。根据恒温箱的温度要求进行恒温槽的温度设定，开启制冷及搅拌电机使槽体内温度达到设定温度，待温度稳定后启动磁力水泵，设定流速，使恒温介质从槽体内沿保温循环管路进入到恒温箱的换热盘管中，从恒温箱的出口回流到恒温槽循环管路入口，如此循环反复，实现恒温箱内温度恒定、稳定、均匀。[6]

恒温箱采用一个订制 500×500×900 mm 的长方体不锈钢箱体，箱体外部的左右，后侧，下侧敷贴盘管式接触换热器，并配备风机，恒温箱四周做保温处理，双侧上盖，双层前门加保温并开双层玻璃观察窗。恒温箱内风机可单独控制并可调节风速，前期可通过风机加速空气流动，提升均温效率，随着时间的推移，恒温箱内的温度会逐步与恒温槽内循环液的温度达到平衡。通过实验，温度控制系统的温度波动度达到 0.05 ℃，温度均匀度：0.1 ℃，满足设计要求。

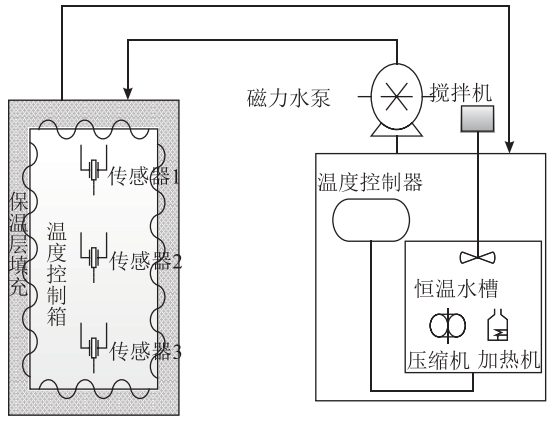

图 8　温度控制系统原理图

1.6　计算机控制及数据采集处理系统设计

数据采集处理系统实现了对大气压力、超声液位、激光位移、温度控制等系统的数据采集和处理，同时实现位移和限位器的控制。并设计了一体化的系统机柜，实物如图 9 所示。将计算机主机和显示器、超声定位系统、温度测量系统、压力控制系统(手动和自动)、精密大气压力计等集成到一起，方便数据采集和控制。

图 9　一体化系统控制机柜实物图

微压标准装置软件主界面(见图 10)包含压力控制、电机位移控制、参数显示(容器温度、管路温度、环境温度、容器液位显示、大气压力等)和计算结果显示等部分，以及参数设置界面(重力加速度等参数)。计算结果显示部分显示工作介质密度、环境空气密度、重力加速度，两个容器液位变化、可动容器位移等信息，并将压力值实时计算显示。环境温度、大气压、容器温度是通过温度传感器和大气压力计实时采集得到，工作介质密度是通过查密度表得到的，环境空气密度是通过公式计算得到。

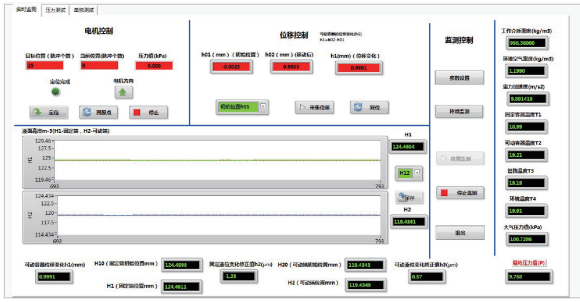

图 10　微压标准软件界面

2　不确定度分析及试验验证

微压标准产生的压力值不确定度分析的测量模型见公式(1)所示，主要标准不确定度分量见表 1。

表 1　不确定度分量列表

标准不确定度分量	具体描述	不确定度分量/Pa
工作介质密度	密度值计算引用 温度测量导致密度不准	0.008
空气密度	大气压力测量引入 温度测量引入	0.00036
重力加速度	重力加速度实测值引入	0.004
高度测量	激光测长系统引入 超声定位系统引入 丝杠垂直度引入 零位漂移引入	0.044
重复性	重复性引入	0.002

以上各项标准不确定度分量互不相关，所以合成标准不确定度为 $u_c(p)=0.046$ Pa，扩展标准不确定度取包含因子 $k=2$，则：$U=0.10$ Pa($k=2$)。

不确定度试验验证采用 0.01 级数字压力计作为传递标准，溯源到中国计量科学研究院得到一组测量值，并用本标准装置测量得到另一组测量值，验证数据见表 2，通过验证数据可以看到 E_n 值均小于 1，该标准的技术指标得到验证。

表 2　不确定度试验验证数据及结果

压力点/kPa	微压装置		计量院		E_n 值
	测量误差值/Pa	扩展不确定度/Pa ($k=2$)	测量误差值/Pa	扩展不确定度/Pa ($k=2$)	
1	0.18	0.1	0.26	0.07	0.66
2	0.16	0.1	0.25	0.12	0.58
3	0.12	0.1	0.22	0.17	0.51
4	0.13	0.1	0.22	0.22	0.37
5	0.16	0.1	0.25	0.27	0.31

3　结论

研制的 5 kPa 微压力标准装置，通过将超声波测量定位技术与激光干涉仪测长技术相结合的方式，即固定容器和可动容器液位高度采用超声准确定位技术，可动容器移动距离采用激光干涉精确测量技术，满足液柱高度准确测量要求，并通过研制温度控制系统、位移控制系统、数据采集处理系统，同时对各环境影响量进行研究，对装置综合性能进行试验以及测量不确定度分析和验证。研制成果填补了国防系统 5 kPa 以下微压标准装置空白，解决国防系统高准确度微压仪器仪表的溯源问题。

参 考 文 献

[1] 闫继超，李鑫武，彭轶．微压测量和校准技术分析与发展趋势[J]．计测技术．2017，37(02)：11－14.
[2] 李燕华．标准补偿式微压计不确定度分析[C]//2001 全国压力计量测试技术年会．中国计量测试学会会议论文集．2001：45－49.
[3] 于靖岩．压力计量测试技术与发展趋势[J]．黑龙江科学，2019，10(24)：124－125.
[4] 李燕华，王金库．基于超声测长技术和激光干涉技术的0～2500 Pa 压力基准装置设计[J]．计测技术，2012，32(6)：41－45.
[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.
[6] 赵静，吕国义，李鑫武，等．一种外循环式温度恒温箱设计[J]．计量技术．2018：16－18.

收稿日期：2021－02－20
基金项目：国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2015205A009)

作者简介

李鑫武(1980－)，男，高级工程师，2002 年至今在中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所工作，目前担任力学研究室静态压力质量专业主任工程师，现任全国压力计量技术委员会委员，中国计量测试学会压力计量专业委员会秘书长，国家计量标准一级考评员，国防计量主考员。作为项目负责人先后完成多项科研项目，主要研究方向有高静压差压校准、微压校准、特殊环境下压力校准、现场压力校准、大气数据校准等，曾获多次省部级奖励及多项国家发明专利。作为某几项最高计量标准的负责人，完成大量计量人员的培训考核和计量标准考核工作，作为第一或主要起草人，先后编制了多项计量技术规范，并完成多次规范宣贯工作，组织了多项能力验证工作，作为副主编完成了《压力测量不确定度评定实例》一书的编制工作。