

基于声学方法的固体材料质量参数测量装置研究

费利萍, 尚贤平, 毛晓辉 浙江省计量科学研究院

[摘要]应用声学非接触式测量原理对高等级砝码体积进行测量, 研制了一组自动无扰动固体材料质量参数测量装置, 测量范围 1kg ~ 20kg, 该装置的测量结果不确定度优于 6×10^{-4} ($k=2$), 提高了高等级砝码体积测量的效率; 通过对空气密度的测量并定量分析其影响值, 为空气浮力修正提供准确的修正值。

[关键词] 质量参数 声学 无扰动固体材料 体积测量装置 空气浮力修正;

Abstract: In this paper, an acoustic volumeter is proposed for the measurement of the volume of weights. The procedure for measuring the volume of different density and shape weights ranging from 1kg to 20kg using the acoustic volumeter method is proposed. The reliability of the measurement was evaluated with a relative uncertainty below the order of 6×10^{-4} . It provides an accurate correction for the air buoyancy correction. An accurate correction value is provided for air buoyancy correction by measuring the influence value of the air density.

Keywords: quality parameters, acoustic method, material; mass weight; Air buoyancy correction

引言

传统测量质量砝码体积的方法主要采用静水衡量法进行, 但容易受到液体对质量砝码表面的侵蚀影响而引起的砝码本身密度变化。本文介绍的固体材料质量参数自动检测技术, 采用声学非接触式体积测量方法^[1-3], 设计了一套声学法固体材料体积测量装置, 实现对不同材质、形状及带腔体的固体材料的质量砝码体积参数的自动测量, 与液体静力称重法不同, 该方法不需要考虑液体受污染而引起的密度变化, 考虑到声压反射与质量砝码材质、表面形状等的影响, 提出了基于单、双参考质量标准的质量标准体积参数测量方法并建立相应的数学模型进行相关修正, 获取不同材质、不同形状或带腔体质量砝码体积的测量值, 并对其测量不确定度进行了评定, 经实验验证, 该测量装置对 1kg ~ 20kg 不同形状、不同材质以及包含腔体的砝码体积测量结果的不确定度均优于 6×10^{-4} ($k=2$); 应用空气密度测量装置测得不同环境下的空气密度, 并从空气密度的变化情况定量分析研究高等级砝码质量值在传递过程中的影响值, 为空气浮力修正提供准确的修正值, 减少了高等级砝码在量值传递过程中由于检定环境变化带来的不确定度影响。

1. 测量装置的工作原理

本装置采用声学非接触测量原理^[4-5], 如图 1 所示, 通过腔体提升控制机构提升参考腔体、测量

腔体，实现参考砝码和被测砝码的加卸载，再通过声信号发生系统对测量腔体发出不同频率的声音信号，在参考腔体、测量腔体中产生不同的声压，利用声信号采集系统和声信号分析系统采集和分析参考腔体、测量腔体中声压差，计算被测砝码与标准砝码的体积比，从而获得被测砝码的体积测量值。

应用空气密度测量系统实时检测不同环境条件下的空气密度，通过被测固体材料（砝码）的体积测量值和空气密度值，可以计算固体材料（砝码）在空气的浮力值，为固体材料（砝码）在量值传递过程中空气浮力修正提供准确的修正值。

其基本的测量原理基于气体压缩定律^[4-5]，砝码的体积可表示为

$$V = V_0 \left(1 - \frac{R}{R_0} \right) \{ 1 + Cf(V, R, S) \} \quad (1)$$

式中：V 为待测砝码的体积；V₀ 为空腔时测量腔体的体积；C 为相关系数；为体积 V 的函数；S 为砝码的表面积；R 为当测量腔体中放置了被测砝码时的腔体内的声压振幅比（两个麦克风输出的信号）；R₀ 为空腔时的两个腔体声压振幅比。

$$R = \frac{E_1}{E_2} \quad (2)$$

E₁ 和 E₂ 信号的幅值和相位值由傅立叶公式变换计算获得。

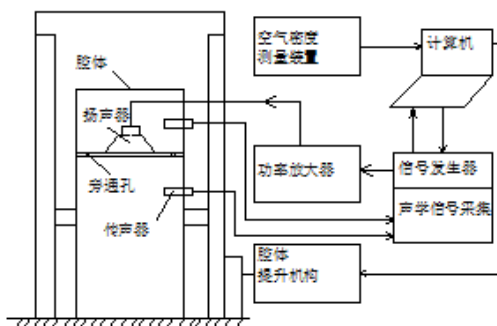


图 1 基于声学方法的固体材料体积测量装置结构示意图

2. 装置的构成

固体材料质量参数测量装置主要由腔体及提升机构、声学信号系统、空气密度测量系统组成，测量装置有两个腔体（基准容积腔体，被测砝码体积测量腔体），通过一个旁通管，联通两个腔体使其静压力和空气湿度均衡，位于在这两个容器之间的扬声器由一个正弦频率信号驱动，信号模式可通过计算机程序设置。测量过程中扬声器的一面产生一个交变隔热的声压信号给基准容积腔体，同时其反面产生一组相位相反的绝热声压信号给砝码体积测量腔体。通过测量空腔的声压比 R₀ 和放入参考砝码与被测砝码的声压比 R 和 R₁，得到被测砝码相对于参考砝码的体积比值。由于参考砝码的

体积已知，从而计算得到被测砝码的体积，实物如图 2 所示。



图 2 装置实物图



图 3 腔体提升与控制系统

2.1 腔体系统及提升机构

腔体系统由参考腔体、测量腔体，腔体底座、橡胶垫块等组成，参考腔体即基准容积腔体，测量腔体放置参考砝码或被测砝码，通过腔体提升机构实现腔体上下平滑移动，腔体提升控制机构包括腔体提升机构（丝杠、步进电机）、提升控制器（电机驱动及 PLC 控制器），如图 3 所示。

由于采用基于声学法的原理进行测量，腔体的加工和密封性显得尤为重要，在本项目的研究中采用铝合金材料保证了部件的加工精度，同时采用防震垫由丝杠自动压紧腔体底座，保证了腔体的密封，使得在测量中声波信号不受外界影响。此外，我们通过大量的试验，发现测量腔体的空腔体积，对测量体积的测量误差存在明显的影响，为了降低体积测量误差的离散性，我们一共做了大中小三套腔体以减小空腔体积，腔体尺寸分别为 260×450 、 220×410 、 170×270 用于 20kg, 10kg, 5kg~1kg 砝码的体积测量，如图 3 所示。同时在测试过程中使用圆柱形的特氟龙垫块，可有效减小测量误差，具体的试验情况及结果已在文献^[6]中进行了详述，结果显示，使用圆柱形的垫块测量的砝码体积偏差大约是没有使用时的 1/2。

2.2 声学信号系统

声学信号系统由声信号发生系统（声信号发生器、信号功率放大器、扬声器）、声学信号采集系统（传声器）及声信号分析系统（多通道声学振动分析仪）组成，如图 4 所示。



图 4 声学信号采集与处理

在装置工作过程中，考虑频率、幅值对被测质量标准体积参数的影响，即如何选择最优的方案实现最佳测量，是本装置研究的关键。

为此项目组对两组声学振动分析仪在相同条件做了精度测试，信号幅度 0.05v；采样间隔 0.01s，线型平均方式，平均次数 99 次 / 秒，10kg 砝码，测试功率放大器: 6dB，其测试结果分别如表 1、2 所示:

表 1 A 公司声学振动分析仪测试结果

单位:mPa	参考砝码Vr1 (0.95)		参考砝码Vr2 (1.0)		空腔R0		单参考法	
	频率:Hz	上腔声压	下腔声压	上腔声压	下腔声压	上腔声压	下腔声压	体积比
35	6304.0	2483.0	6208.0	2507.0	6756.0	2287.0	0.868993	-8.527
40	10223.0	4050.0	10212.0	3971.0	10877.0	3583.0	1.102239	16.025
45	10261.0	4137.0	10400.0	4173.0	11136.0	3753.0	1.025077	7.903
50	12836.0	5301.0	13413.0	5442.0	14167.0	4822.0	1.091467	14.891
55	12442.0	5192.0	12682.0	5293.0	13483.0	4675.0	0.999213	5.180
60	15944.0	6655.0	15672.0	6671.0	16924.0	5850.0	0.914442	-3.743

表 2 B 公司的声学振动分析仪测试结果

单位:mPa	参考砝码Vr1 (0.95)		参考砝码Vr2 (1.0)		空腔R0		单参考法	
	频率:Hz	上腔声压	下腔声压	上腔声压	下腔声压	上腔声压	下腔声压	体积比
35	1249	471	1222	464	1275	406	0.964118	1.486
40	1445	553	1413	545	1490	481	0.959689	1.020
45	1627	631	1606	629	1676	549	0.949581	-0.044
50	1743	683	1826	723	1842	609	0.947121	-0.303
55	1917	784	1788	738	1833	619	0.958421	0.886
60	2098	836	2096	843	2206	743	0.951913	0.201

显然，选择不同的声学振动分析仪对体积测量结果有较大影响。

依据公式 (1) 幅值比率 $R(f)$, 作为 f 的一个函数, 可见砝码体积的测量和频率的大小有直接关系, 因此我们通过大量的实验来评价频率对测量体积的影响值, 从而确定声学体积测量合适的频率。如参考文献^[6]所述, 在频率 85Hz 时, 声学测量法的测量偏差要小, 在相对高频的范围内随着频率的增大, 体积测量的偏差有逐渐减小的趋势, 而随着腔体和被测物的增大, 在稍低的频率 65Hz 段声学法测得的体积偏差为最小。

2.3 空气密度测量系统: 二氧化碳气体检测器、大气压力检测器、温湿度检测器。



图 5 空气密度测量装置

根据 JJF99-2006《砝码》计量检定规程^[7]要求，当空气密度对被检砝码质量值的影响大于该砝码最大允许误差的 1/9 ($\pm 0.12\text{MPEV}$) 时，应进行必要空气浮力修正，在测量不确定度计算时应引入空气密度变化的影响因子，以保证高等级砝码量值传递的准确可靠。

在本装置的研究中我们考虑了如图 5 所示的空气密度测量装置，实现在测量不同环境条件下的空气密度，测量结果如表 3

表 3 不同空气状态下的潮湿空气密度

序号	温度 (°C)	湿度 (%RH)	压力 (hPa)	CO2含量 (ppm)	空气密度 (kg/m ³)
1	22.77	52.1	1016.17	435.1	1.1903
2	22.19	58.5	1016.46	435.2	1.1924
3	21.71	62.1	1016.78	427.1	1.1946
4	21.37	63.5	1017.26	423.6	1.1965
5	20.67	67.8	1017.31	418.2	1.2392
6	20.32	69.0	1017.31	412.1	1.2417
7	19.80	70.4	1017.34	413.3	1.2412
8	19.42	71.5	1017.35	407.0	1.2473
9	18.63	72.0	1017.17	418.3	1.2542
10	18.07	78.7	1017.02	421.6	1.2684

由表 3 可见，在低海拔的地理状态下，相对空气密度随着温度的降低、湿度的增大而逐渐变大，从中我们可进行定量分析确定其影响值并加以修正，减少测量不确定度的影响，提高高等级砝码在量值传递过程的测量准确度，检定环境空气密度变化对折算质量值测量结果的影响分析在文献^[8]中已有详细的介绍。

3. 装置的测试结果

3.1 测试仪器与设备

采用 F1 级 OIML 型无磁不锈钢 (JF-1) 作为标准砝码，对于每一组标称质量范围从 1kg、2kg、5kg、10kg、20kg 的砝码分别制作 3 个，每个砝码质量分别按标准砝码的 0.95，1.00 倍和 1.05 倍制造，准确度等级、形状和外部尺寸均符合 JJG99-2006《砝码检定规程》^[8]的要求，实物如图 6 所示。



图 6 测试用标准器

3.2 体积测量结果

测试过程中对被测砝码的声压比、空腔声压比，参考砝码的声压比进行记录，得到被测砝码的声压比值。根据体积比由计算机自动给出被测砝码体积测量结果，并进行测量不确定度评定，砝码体积测量结果如表 4。

其测量结果的不确定度主要来自被测砝码体积测量重复性、被测砝码体积测量的非线性（包括表面积的影响带来的不确定度）、参考标准砝码的体积标准不确定度等。计算实例详见参考文献^[9]。

表4 不同材质、不同形状及带腔体砝码体积测量结果

形状及材质	标准砝码质量 (kg)	空腔声压比/标准砝码声压比	标准砝码声压比	被测砝码声压比	被测砝码体积比值	被测砝码体积(cm ³)	均值 (cm ³)	测量不确定度[$\times 10^{-4}$] ($k=2$)
OIML型 JF-1不锈钢材质	1	5.37638	5.15821	5.16732	0.95824	119.78045	119.776	4.5
		5.37642	5.15823	5.16739	0.95803	119.75402		
		5.37645	5.15830	5.16740	0.95828	119.78543		
OIML型铜材质	1	5.37619	5.15841	5.17034	0.94522	118.15249	118.137	4.7
		5.37621	5.15844	5.17041	0.94503	118.12922		
		5.37621	5.15842	5.17039	0.94504	118.12985		
OIML型不锈钢材质	2	5.41131	5.00363	4.99124	1.03039	257.59787	257.607	4.9
		5.41142	5.00364	4.99124	1.03041	257.60214		
		5.41133	5.00363	4.99120	1.03049	257.62203		
马蹄型铜质材质	2	5.41123	5.00361	5.03122	0.93227	233.06634	233.055	5.2
		5.41134	5.00359	5.03119	0.93231	233.07787		
		5.41136	5.00364	5.03133	0.93209	233.02144		
带调整腔不锈钢材质	2	5.41152	5.00343	4.96918	1.08393	270.98189	271.044	5.2
		5.41151	5.00358	4.96932	1.08398	270.99625		
		5.41124	5.00361	4.96912	1.08461	271.15276		
锁型铁材质	5	5.41128	4.35552	4.31158	1.04162	651.01207	651.051	5.1
		5.41131	4.35523	4.31126	1.04164	651.02194		
		5.41162	4.35558	4.31145	1.04179	651.11762		
马蹄型不锈钢材质	5	5.41165	4.35561	4.34211	1.01278	632.98975	632.985	5.2
		5.41144	4.35553	4.34216	1.01266	632.91379		
		5.41125	4.35556	4.34196	1.01288	633.05161		
带调整腔 JF-1不锈钢材质	5	5.41136	4.35558	4.29916	1.05344	658.39948	658.304	4.8
		5.41135	4.35542	4.29922	1.05322	658.26452		
		5.41166	4.35537	4.29918	1.05320	658.24726		
OIML型 JF-1不锈钢材质	10	5.41399	3.31703	3.41522	0.95318	1191.46884	1191.291	4.5
		5.41429	3.31760	3.41675	0.95271	1190.88897		
		5.41335	3.31795	3.41599	0.95321	1191.51475		
锁型不锈钢材质	10	5.41525	3.30641	3.26434	1.01995	1274.93670	1275.434	5.0
OIML型不锈钢材质	10	5.41536	3.30666	3.26323	1.02060	1275.74453	1275.598	4.7
		5.41626	3.30653	3.26329	1.02050	1275.61939		
		5.41375	3.30601	3.26332	1.02025	1275.31740		
OIML型 JF-1不锈钢材质	20	5.41466	3.30716	3.26321	1.02085	1276.06762	2541.802	5.1
		5.41342	3.30602	3.26318	1.02033	1275.41046		
		3.24217	2.65332	2.64326	1.01708	2542.71037		
OIML型铜材质	20	3.24166	2.65314	2.64333	1.01667	2541.67233	2251.35	5.4
		3.24255	2.65323	2.64356	1.01641	2541.02186		
		3.21423	2.65202	2.67626	0.95689	2251.50195		
OIML型铜材质	20	3.21417	2.65315	2.67737	0.95682	2251.33869	2251.35	5.4
		3.21423	2.65245	2.67626	0.95761	2253.20432		

4. 结束语

本文介绍的基于声学方法的动固体材料质量参数测量装置，采用基于单、双参考质量标准体积测量方法，可实现对不同材质、不同形状及带腔体的固体材料的质量砝码进行体积参数的自动测量，在装置的设计研究过程中，充分考虑了空腔体积对测量结果的影响以及进行了信号增益和测量频率等关键因素的研究，根据测量结果，分析了测量不确定度，结果显示所有实验砝码的体积测量结果的相对扩展不确定度值均小于 6×10^{-4} ；通过精确测量空气密度，定量分析不同材质质量值的

高等级标准砝码在量值传递过程中的影响值并为空气浮力修正提供准确的修正值。该研究成果可与高端动力装置扭矩测量仪器实现集成，为扭矩测量仪器项目中质量参数的正确测量提供技术支持，可在高等级砝码量值传递中发挥重要的作用，装置的研究经费得到国家重大科学仪器设备开发专项（2012YQ090208）的大力支持。

【参考文献】

[1] Torigoe I and Ishii Y. Acoustic bridge volumeter Trans[J]. Soc. Instrum. Control Eng. 2001, (1): 70-164

[2] Kobata T, Ueki M, Nezu Y, Ooiwa A and Ishii Y. Characterization of an acoustic volumeter for measuring the volume of weights Proc[J]. 15th IMEKO World Congress, 1999(3): 205-12

[3] Ueki M, Kobata T, Mizushima S, Nezu Y, Ooiwa A and Ishii Y. Application of acoustic volumeter to standard weights Proc[J]. 15th IMEKO World Congress, 1999(3):213-20

[4] Ishii Y. An acoustic volumeter Meas[J]. Control, 1997(36): 288-91

[5] Ishii Y. Instruction Manual of Acoustic Volumeter for Measuring Volume of Weight VM-300[M] Japan:Measurement Science Laboratory, 2000:5-20

[6] 毛晓辉、尚贤平等. 非接触式不同材料砝码体积测量研究 [J]. 衡器, 2016(7): ISSN1003-5729

[7] JJG99-2006, 砝码检定规程 [S]. 国家质量检验检疫总局

[8] 尚贤平、费利萍等. 空气密度对高等级砝码量值传递工作的影响 [J]. 衡器, 2015(11):ISSN1003-5729

[9] 费利萍、尚贤平等. 基于声学非接触式砝码体积测量结果的不确定度评定 [J]. 衡器, 2017(11):ISSN1003-5729

作者简介：费利萍（1964- ），女，杭州市人，教授级高工，本科，研究方向为力学计量。