doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2021.03.09

脉冲式动态压力溯源方法研究

史博，杨军，蔡菁，王辰辰，李程
（航空工业北京长城计量测试技术研究所，北京 100095）

摘　要：动态压力测试在工业领域应用越来越广泛，可靠的校准技术是动态压力量值准确的保障，而溯源问题一直是制约动态压力校准技术发展的瓶颈。本文以基于激光干涉的可溯源动态压力测量方法为研究对象，针对液体脉冲压力的特点，建立基于牛顿第二定律的脉冲压力测量模型，对各影响因素引入的误差进行分析和测试，通过压力传感器校准试验完成激光干涉测量可行性验证和测量不确定度分析，实现脉冲压力的可靠溯源。

关键词：动态压力；溯源；激光干涉
中图分类号：TB935　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674－5795(2021)03－0046－05

Research on Pulse Dynamic Pressure Tracing Method

SHI Bo，YANG Jun，CAI Jing，WANG Chenchen，LI Cheng
（Changcheng Institute of Metrology & Measurement，Beijing 100095，China）

Abstract：Dynamic pressure testing is more and more widely used in the industrial field，and reliable calibration technology is the guarantee of accurate dynamic pressure value. Traceability has always been the bottleneck of the development of dynamic pressure calibration technology. This paper takes the traceable dynamic pressure measurement method based on laser interference as the research object. According to the characteristics of liquid pulse pressure，a measurement model based on Newton's second law is established，and the errors caused by various influencing factors are analyzed and tested. Through the calibration test of pressure sensor，the feasibility verification of laser interference measurement and the analysis of measurement uncertainty are completed. The reliable traceability of pulse pressure is realized.

Key words：dynamic pressure；traceability；laser interference

0　引言

随着技术的发展，目前针对压电式压力传感器灵敏度及火炮膛压的校准基本采用脉冲式动态压力校准装置实现，其工作原理为：自由下落的锤体撞击液压活塞系统，在液压缸中产生近似半正弦的脉冲压力波，液压缸的两侧对称安装被校压力传感器和标准压力传感器，取被校传感器和标准传感器输出曲线的峰值点进行比较法校准。脉冲式动态压力校准装置操作简单，在动态压力的校准试验中被广泛使用，但由于其准确度主要受限于标准压力传感器性能，很难再有所提高。国内现有的脉冲压力校准装置已经不能完全满足高精度动态压力测量的需求，因此研究能进行可靠量值溯源的绝对法脉冲压力校准装置十分必要[1－3]。

1　溯源方法

在脉冲式动态压力的溯源方式的研究方面，南京理工大学曾提出了间接比较法，即用多支传感器换位测量，最后再对多组数据进行分析[4－5]；PCB 公司相关研究人员提出在落锤式脉冲压力校准装置产品 913A10 中使用加速度计进行校准[6－8]，其幅值不确定度为 3%；另外，国内相关研究机构还曾提出用力传感器测量锤体下落过程中力值的方法进行校准。这几种方法的校准结果受到压力传感器、加速度传感器或力传感器的动态性能的影响，其本质还是比较法校准，而且这几种方法未考虑对锤体的加速度分布以及液压缸中油介质的压力场分布不均等因素对压力幅值计算带来的影响。

国外学者通过对液压活塞系统进行建模仿真，采用数值模拟的方式计算液压缸内不同位置的脉冲压力[9]，如图 1 所示，这种采用纯仿真计算的方法对于校准装置的溯源性研究并不完全合用，很多影响因素并不能得到实际的试验验证。

还有研究机构提出基于活塞位移的校准方法，即采用高速摄像机拍摄活塞杆的位移量，得到液压缸中液体介质的体积变化，再通过体积模量等参数计算得到脉冲压力的幅值[10]，原理如图 2 所示。这种方法相

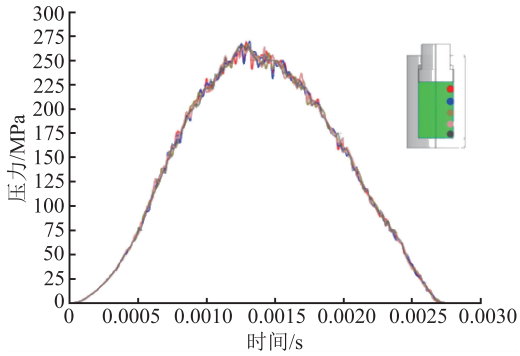

图 1　基于模型仿真的脉冲压力波形图

对简单，但是对液压活塞系统的密封性要求很高，泄漏会导致测量结果偏差较大；并且在液压油被压缩的过程中，还伴随着温度的变化，因此液压油的体积模量、热膨胀系数等属性将会发生变化，会使测量结果产生较大误差。

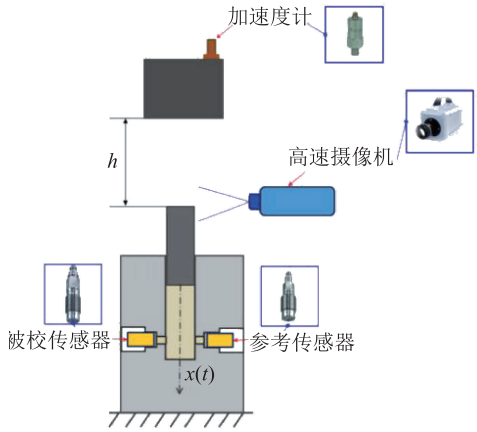

图 2　基于活塞位移的校准原理图

近二十年来，随着光学测试技术的发展，光学精密测量因其非接触性、高灵敏度和高精度等优点，在科学研究、工业生产、空间技术等领域得到广泛应用。而在传感器校准工作中，激光干涉测量技术也为各国所重视。

德国 PTB 相关学者研制了基于折射率激光干涉测量的液体脉冲压力校准装置[11]。其采用水为压力介质，利用压力变化引起激光在水中的折射率变化，并通过静态标定的方法实现脉冲压力测量。该课题组分析了此装置的基本原理以及温度变化带来的影响，完成了静态压力试验与 400 MPa 脉冲压力初步试验，测量示意图如图 3 所示，部分试验曲线如图 4 所示。但是随着压力的增加，明显的非线性等问题还有待进一步研究。

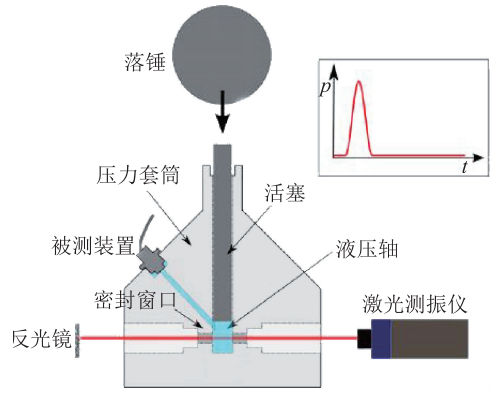

图 3　基于折射率的激光干涉测量示意图

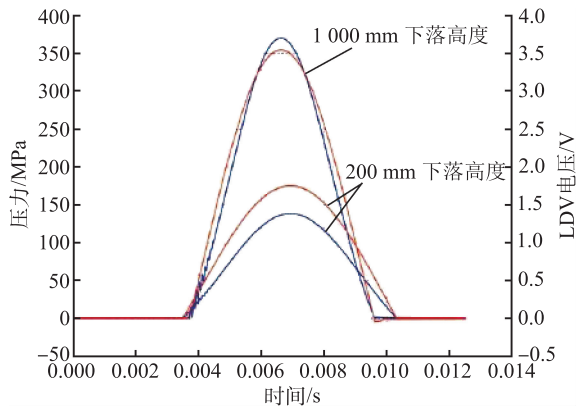

图 4　PTB 脉冲压力曲线图

下面对航空工业计量所的脉冲压力溯源方法及手段进行介绍，通过数学模型的推导及相关影响因素的分析，最终解决脉冲式动态压力的溯源问题。

2　标准装置及数学模型

近年来，航空工业计量所在基于光学的测试方法方面进行了大量研究，在相关课题中研究了 500 MPa 范围内脉冲压力的绝对法校准。

脉冲压力发生器采用落锤跌落冲击液压腔活塞产生压力脉冲，通过压力发生器的动力学模型和光学方法测量锤体的加速度，计算得到压力脉冲的峰值，实现脉冲压力的可靠溯源，提高校准准确度[12-14]。装置实物如图 5 所示，波形曲线如图 6 所示。该装置首次实现了将脉冲压力溯源至长度、时间、质量等基本物理量，并建标成为最高标准，为广泛使用的不适合进行静态校准的中高压传感器提供可靠的计量保障打下基础。

利用宽频带、高精度光学测量技术测量锤体与活塞等结构的运动参数，并转化为液压缸中的压力量，

图 5　脉冲式动态压力标准装置

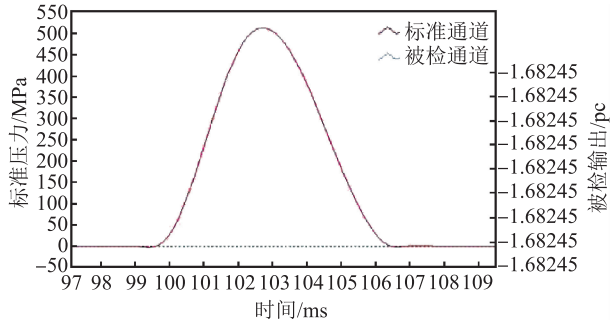

图 6　脉冲式动态压力波形曲线

在此过程中需要对脉冲压力发生器进行动力学建模，建立运动参数与压力之间的关系式，并对压力不一致、锤体加速度分布不均等影响因素进行分析补偿。通过对活塞杆以及锤体等结构进行受力分解，建立脉冲压力与加速度、质量与面积之间的数学模型，使脉冲压力峰值能溯源到时间、长度与质量等基本量。基于锤体加速度校准方法原理图如图 7 所示。

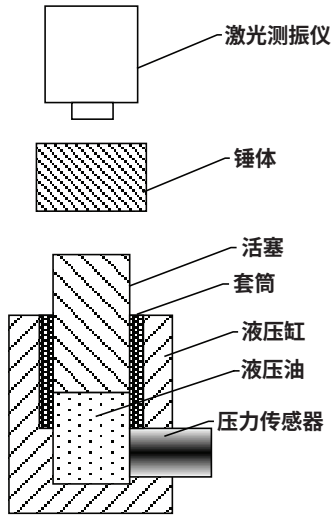

图 7　基于锤体加速度校准方法原理图

将锤体 m_1、活塞杆 m_2 看成一个整体，它们受到重力 $(m_1 + m_2)g$，在锤体碰撞活塞杆的过程中，激光测振仪实时监测锤体的加速度变化，忽略锤体加速度分布不均以及液压缸中压力不一致与分布不均等因素，则锤体和活塞还将受到惯性力 $(m_1 + m_2)a$、摩擦力 f 以及液压油作用在活塞杆下端面的压力 pS，通过分析，有

$$(m_1 + m_2)g - (m_1 + m_2)a + f = pS \tag{1}$$

变换后有

$$p = \frac{(m_1 + m_2)(g - a)}{S} + \frac{f}{S} \tag{2}$$

通过分析可以看出，上述模型是基于一系列的简化和假设建立的，但在实际的试验过程中，各影响因素均会引入误差，因此需要对公式(2)所建立的模型进行修正，主要体现在以下几个方面：

1)摩擦力 f：除了活塞杆与套筒之间的摩擦力之外，还应考虑锤体与托板扶正机构之间的摩擦力。

2)压力不一致 Δp：通过公式(2)计算得到的压力为活塞杆下端面的脉冲压力，而其与实际校准过程中被校压力传感器感受到的压力并不相同，产生这种现象的原因是压力波在液体介质中的传播会造成压力场分布不均，且液介质自身的重量和运动也会导致压力分布不均。

3)平均加速度 $\bar{a}$：由于锤体的体积及质量较大，在高速运动过程中，锤体与活塞杆的加速度会存在分布不均及不一致的现象，但装置中的激光干涉测量系统只能测量锤体上一个点的加速度 a，而公式(1)和公式(2)中的加速度应为锤体与活塞整体的平均加速度 $\bar{a}$。

4)有效面积 S：在高幅值压力下活塞与活塞筒的间隙处因形变会产生介质泄漏，造成活塞的压力有效作用面积 S 与初始测量活塞截面积 S_0 不一致。因此，完整的数学模型为

$$p = \frac{(m_1 + m_2)g}{S} - \frac{(m_1 + m_2)\bar{a}}{S} + \frac{f}{S} + \Delta p \tag{3}$$

式中：p 为活塞端面压力；S 为活塞的有效面积；$\bar{a}$ 为锤体以及活塞的平均加速度(向下为正)。

质量 m_1，m_2 可以通过常规测量方法较准确地得到，g 即当地的重力加速度可查询得到，而平均加速度 $\bar{a}$ 由激光干涉测量系统从顶部测量锤体运动之后进行修正得到，压力分布不均 Δp 和摩擦力 f 可通过试验得到。

3　试验结果及不确定度评定

采用压电式压力传感器进行试验，对压电式压力传感器和激光干涉测量得到的压力结果进行比较分析，对主要测量系统误差来源进行分析与测试评估，包括

摩擦力、加速度分布不均等。试验结果如图 8 所示，红色为通过激光测量计算得出的压力曲线，蓝色为传感器输出曲线。

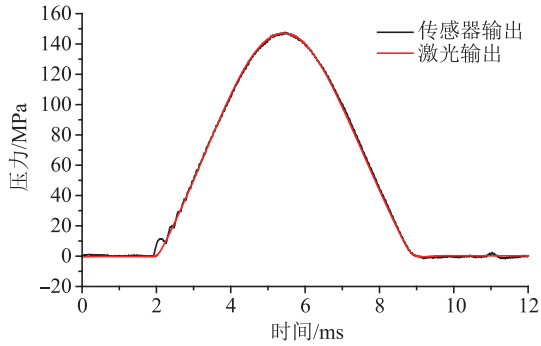

图 8　试验结果曲线

结合测量重复性以及数据采集分析系统等因素引入的不确定度，由式(3)可得

$$u(p) = \sqrt{\sum_{k=1}^{7} u_k^2(p)} \tag{4}$$

公式(4)中的不确定度分量主要由以下几个方面组成：

1)加速度测量

加速度测量引入的不确定度由锤体的加速度分布不均以及激光测量引入的误差组成，这两部分因素通过上一级机构校准以及试验测试，得到不确定度分量为

$$u_{ref1}(p) = \sqrt{\frac{0.0087^2 + 0.005^2}{3}} = 0.58\%$$

2)摩擦力

根据实际不同压力幅值的试验需求，分析不同质量的锤体与不同直径活塞，以及不同活塞与套筒之间的配对测试结果，得到摩擦力引入的分量为

当压力为 10 MPa 时

$$u_{ref2}(p) = \frac{1.8/(5.027 \times 10^{-5})}{10 \times 10^6}/\sqrt{3} = 0.21\%$$

当压力为 200 MPa 时

$$u_{ref2}(p) = \frac{1/(1.96 \times 10^{-5})}{200 \times 10^6}/\sqrt{3} = 0.04\%$$

当压力为 500 MPa 时

$$u_{ref2}(p) = \frac{5/(1.96 \times 10^{-5})}{500 \times 10^6}/\sqrt{3} = 0.04\%$$

3)活塞杆有效面积

通过在标准活塞压力计上进行有效面积的计量测试，确定活塞杆有效面积引入的不确定度分量为 0.02%。

4)锤体以及活塞杆质量

锤体质量以及活塞杆质量在标准天平上计量，由上一级检定证书，得到标准天平的不确定度分量为 0.01%。

5)压力不一致

由于常用的液压介质中的声速基本超过 1200 m/s，而脉冲压力的频谱主要集中在较低频率，压力波的波长基本大于 6 m，远大于液压腔内空间尺寸。通过分析压力波在流体介质中传播的规律，并经过相关的实验测试，得到压力不一致引入的不确定度为 0.32%。

6)数据采集分析系统

通过上一级计量机构计量，得到数据采集系统电压幅值测量的最大示值误差，结合电学计量标准的不确定度，确定数据采集分析系统的不确定度为 0.21%。

7)测量重复性

通过相同状态(使用同样的活塞系统锤体组合以及锤体相同高度)对同一压力传感器进行多次灵敏度测量，计算得出测量重复性引入的不确定度为 0.5%。

表 1　不确定度来源数据表　%

不确定度来源	分量	合成标准不确定度	扩展不确定度($k=2$)
加速度测量	0.58		
摩擦力	0.21		
活塞杆有效面积	0.02		
锤体质量	0.01	0.89	1.8
压力不一致	0.32		
数据采集分析	0.21		
测量重复性	0.5		

综上，得到脉冲式动态压力校准装置的不确定度为 1.8%($k=2$)。

4　结论

目前脉冲式动态压力校准装置主要采用比较法进行校准，难以直接溯源至计量学的基本量，其准确度主要取决于标准压力传感器的动态性能。本文研究采用激光测量锤体加速度的方式得到脉冲压力，解决了标准压力传感器难以溯源的问题，建立基于牛顿第二定律的力学模型，将动态压力幅值直接溯源至计量学

中时间、长度、质量等基本量，复现脉冲式动态压力的单位量值，极大地提高了压力测试系统幅值灵敏度校准的准确性及可靠性，对建立脉冲动态压力量值传递体系具有重大意义。

参 考 文 献

[1] Zhang Q, Shang F, Kong D. Quasi-static Calibration of Piezoelectric Sensor Using Half-sine Pressure Pulse[J]. International Society for Optics and Photonics, 2010: 7544.

[2] 朱明武. 半正弦压力源的模型与设计[C] //全国压力计量测试技术年会. 2001.

[3] 孔德仁, 李永新, 朱明武. 冲击波测量用压力传感器准静态校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(z1): 16 - 17.

[4] 孔德仁, 朱明武, 李永新, 等. 压力传感器准静态“绝对校准”[J]. 传感器技术, 2001, 20(12): 32 - 34.

[5] 孔德仁, 孙海波, 朱明武, 等. 压力动态绝对校准方法研究[J]. 南京理工大学学报, 2000, 24(3): 261 - 264.

[6] Yasin Durgut, Ertan Akşahin, Eyup Bağcı, et al. Preliminary Dynamic Pressure Measurement System at UME[C]// XXI IMEKO World Congress, Prague, Czech Republic, August 30, 2015.

[7] Luca Tomasi, Engelbert Wieser, Eju Baruah, et al. Development of a New Piezoelectric Dynamic Pressure Generator for High Pressure Periodic and Aperiodic Calibration[C] // XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croatia, June 22 - 27, 2003: 1995 - 1998.

[8] Lally J, Cummiskey D. Dynamic Pressure Calibration[S]. PRS-TN - 15 - 0205, PCB Piezotronics, 2005.

[9] Elkarous L, Nasri A, Nasri R. Numerical Modeling and Analysis of the Pressure Pulses Generator for the Dynamic Calibration of High-pressure Transducers[J]. Applied Acoustics, 2018, 147: 56 - 63.

[10] Lamine,Elkarous, Marc, et al. Dynamic Calibration of Piezoelectric Transducers for Ballistic High-Pressure Measurement[J]. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2016.

[11] Bruns T, Franke E, Kobusch M. Linking Dynamic to Static Pressure by Laser Interferometry [J]. Journal International de Metrologie Scientifique, 2013: 580 - 585.

[12] 史博, 杨军, 李程. 脉冲式动态压力校准系统模型及性能分析[J]. 计量学报, 2017, 38(S1): 139 - 144.

[13] 杨军, 史博, 樊尚春, 等. 基于激光干涉测量的液体高脉冲压力校准[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 572 - 578.

[14] 史博, 蔡菁. 脉冲式动态压力活塞腔谐振消除方法[J]. 计测技术, 2014, 34(S2): 86 - 87.

收稿日期：2021 - 03 - 20

基金项目：国家“十二五”技术基础科研项目(JO52011A005)

引用格式：史博, 杨军, 蔡菁, 等. 脉冲式动态压力溯源方法研究[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 46 - 50.