

水下低功耗变频数据采集系统的设计

摘要：介绍了水下爆炸冲击波的概念特征和气泡脉动理论，根据此特征确定了水下冲击波超压测试系统的测试原理、采样参数等。系统将压力传感器、适配电路、A/D 转换器、触发控制电路、通讯接口及电池紧凑封装在密闭、防水、坚固的钢壳内，构成一种可相对独立工作的便携式水下冲击波超压测试仪。该系统具有小体积、微功耗、采样频率高等特点，具有抗干扰性强和无需电缆引线的优点，特别适宜于大范围多测点的试验场合。

关键词：水下爆炸；冲击波；压力；测试方法

中图分类号：TN06 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2011)07-0026-04

▶▶ 原玢 赵奇 杨卓静 董冰玉

一、引言

爆炸对于水面和水下物体而言，只有空爆和水下爆炸两种爆炸条件。由于炸药周围的介质不同，爆炸产生的冲击波的特征具有明显的差异。水的可压缩性小，密度大，因而水中初始冲击波压力比空气冲击波大得多。水的密度大，惯性大，爆炸产物的膨胀过程要比空中爆炸慢得多。气泡的脉动次数也要比空中爆炸多，有时可达十次以上。在不同的压力段，水的状态方程不同，因而水中冲击波在不同的压力段，计算方法也不同^[1]。

水下爆炸的研究已有悠久的历史。早期的研究主要是出于军事应用的目的，世界各国的研究者以球形药包在水中爆炸产生的冲击波为主要研究对象，系统研究了其形成、传播、衰减的规律以及冲击波对水中目标的破坏效应，建立起一套相应的理论和计算公式，随着二战后世界各国经济的复苏，水下爆炸广泛地应用于民用建设，如新建港口、桥梁、水工建筑物的岩石基础爆破开挖；增加港湾、湖泊、运河的水深以利通航；港口整治、在已建成的水库和天然湖泊中建造取水口工程；清理航道、炸冰修建围堰和大坝，压密非粘性土；水下爆炸加工和合成金刚石，为水下地震勘探研究提供相关数据等诸多方面产生了巨大的经济效益和社会效益^{[2][3]}。在近代爆破门类中，水下爆破占有一定地位，而且应用日趋广泛。然而水下爆破大多涉及建筑物的安全，因此通常需要现场监测^[4]。

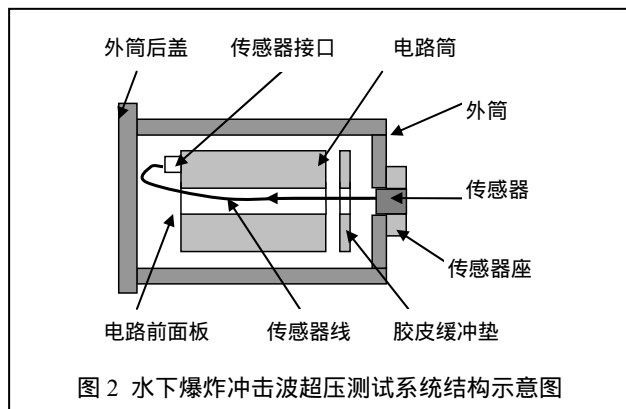
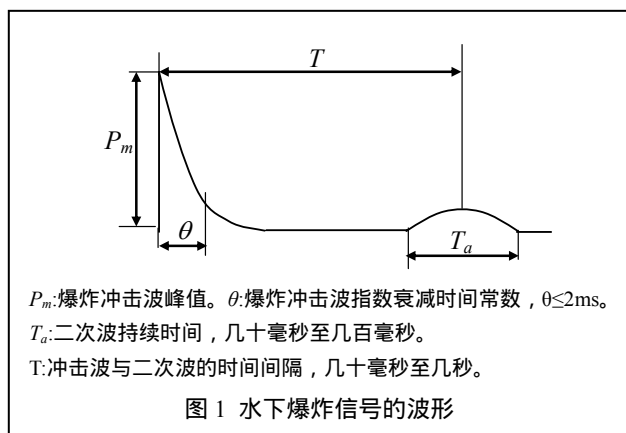
二、水下爆炸冲击波理论研究

炸药在无限水介质中瞬时爆轰，在等容条件下转变为高温高压的爆轰产物，炸药能转变为爆轰产物的内能。爆轰产物高速向外膨胀，压缩水介质形成水中冲击波，消耗一部分能量。这部分能量约占爆轰总能量的53%。爆轰产生的另一部分能量留在爆轰产物内部并以气泡的形式向外膨胀，推动周围的水径向流动，这部分能量约占爆轰总能量的47%。气泡内的压力随着膨胀扩大而不断下降，当压力降至周围水介质的静压时，由于水的惯性运动，气泡过度膨胀直到最大半径，气泡内的压力已大大小于周围海水的压力。此时，被排开的

海水作反向运动，它的潜能从四周向中心压缩气泡。同样由于海水的惯性作用，气泡压缩到一个极小的限度时，其内部压力又大大超过周围海水的静压力，气泡又获得爆炸发生时的类似特性，产生第二次压力脉动，即二次波。就这样，爆炸后的气团在水中以膨胀—压缩—再膨胀—再压缩...不断发展下去，有时可达十余次，这种运动称为气泡脉动。

第二次脉动压力波(以下称二次波)对目标有破坏作用，以后的多次膨胀压力就没什么实际意义了。二次波的最大压力约为冲击波压力的 10~20%，持续时间大大超过冲击波压力作用的时间。气泡在目标附近开始第二次膨胀时，破坏作用显著增大。因此，炸药爆炸的能量可以看作冲击波能与气泡第一次脉动的气泡能之和。

水下爆炸信号的波形如图 1 所示。由图可见，水下爆炸信号是一种类似于单边指数衰减(冲击波)和半余弦脉冲信号(二次波)的单次瞬态信号，即在时域上是瞬态的有限长的，只在爆炸瞬间出现一次(单次)；但它的频谱很宽，通常在零点几赫兹至几百几千赫兹。冲击波前沿陡峭(纳秒量级)，峰值尖锐；相对于冲击波，二次波峰值平缓一些，持续时间长一些；冲击波与二次波之间间隔较长，中间无起伏。



三、测试系统的设计

水下爆炸冲击波数据记录仪由数据记录器、接口、测试数据处理软件三部分组成。数据记录器是一个集压力传感器、瞬态波形记录器、USB 接口、电源等于一体的微型测试装置，内置电压放大器，直流供电，输入信号经放大、高速 A/D 转换后实现自动数字存储。

根据水下冲击波信号和气泡脉动信号的特点，采样过程分为高速采样和低速采样，高速采样频率为 2MHz，存储容量为 1088kW，低速采样频率为 200kHz，存储容量为 960kW，分辨率都为 14byte。触发方案采用负延迟内触发和外触发同时作用，可现场实时采集、量化和存储记录冲击波波形。软件采用面向对象设计的技术，硬件平台为 PC 机，软件平台为 WindowsXP，程序设计由 VISUAL B 实现。软件具备常规的波形显示、打印和计算等数据处理功能。采集结束后，回收数据记录器，通过 USB 接口由计算机对其记录的数据进行自动分析处理。

传感器是测试技术的核心。传感器采用的是美国 PCB 公司生产的 138A38 系列 ICP 压力传感器，该系列传感器专门用于水下爆炸测试，具体技术指标为：

- (1)测量量程 0.07 ~ 344740kPa；
- (2)输出电压范围 -5 ~ +5V；
- (3)灵敏度 3.748mV/MPa；
- (4)最大承受压强 344750kPa；
- (5)谐振频率 $\geq 1000\text{kHz}$ ；
- (6)上升时间 $\leq 3\mu\text{s}$ ；
- (7)低频下限截止频率 $\leq 2.5\text{Hz}$ ；
- (8)非线性度 $\leq 2.0\%$ ；
- (9)供电电压 20 ~ 30VDC；
- (10)直流偏置电压 8 ~ 14VDC。

该传感器具有体积小，响应速度快、精度高等优点，但是需要恒流源供电，并且有直流偏置电压，所以须给传感器提供信号转换电路和调理电路，把冲击波信号调理到合适的电压范围内，方便后续电路进一步对信号处理。

数据记录仪触发方案采用外触发和负延迟内触发共同作用：当信号幅值大于设置的触发电平时启动负延迟，而当信号幅值小于此值时系统处于循环采集状态，从而可以有效地防止干扰引起的误触发与不触发并准确、完整地记录整个冲击波波形。水下爆炸冲击波超压测试系统结构示意图如图 2 所示。

四、系统标定与校准

将信号发生器的输出正弦或方波信号作为电路的输入信号,然后经读数在软件程序上显示波形,从而得出一系列比特值,再利用最小二乘法拟合出压力通道的灵敏度。

落锤装置是一种能产生类似于半正弦压力脉冲的压力发生器,在密闭高压油缸顶部有一活塞,测压传感器安装在高压油缸外侧,落锤自由落下获得一定的动能撞击活塞,活塞压缩高压油缸内的液体,在油缸内产生压力,当落锤的动能全部转化为液体体积变形的弹性势能时,落锤和活塞达到最大行程,油缸内压力最大,然后液体膨胀将活塞和落锤向回推,直到落锤跳离

活塞,油缸内压力恢复为零。落锤下落打击活塞一次,可在油缸内产生一个半正弦压力脉冲。压力峰值 P_m 和脉宽 τ 可以通过调节落锤质量和高度加以改变。落锤动态校准系统组成如图 4 所示,它是由落锤装置、标准传感器、被校测试系统、电荷放大器、高速数字采集卡组成。

当落锤落下产生某一压力后,此压力值被 3 个标准传感器检测到并分别把此压力信号通过电荷放大器传到华采进行数据处理,并得出一个平均值作为此次压力信号峰值的真值;同时,ICP 压力传感器把此压力信号输入到测试电路进行采集存储,并再软件显示,通过定标读值。最后通过这两个量值的比较,得出测试系统压力通道的校准灵敏度系数和误差,以此校正标定灵敏度系数。

图 5 是用落锤打出的一条曲线。图 6 所示为采集卡采集标准压力传感器的压力曲线图。

通过落锤校准发现,系统的标定灵敏度与校准灵敏度的线性误差较大,经过多次校准后,把多次校准灵敏度的平均值作为系统灵敏度的真值。校准灵敏度为:0.2195 MPa/bit

五、结论

该系统具有低功耗、采样频率高、延时时间和触发电平

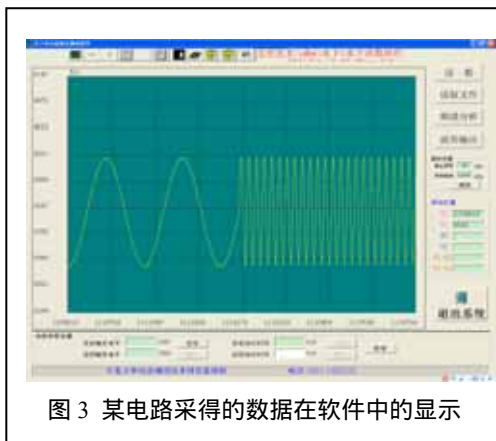


图 3 某电路采集的数据在软件中的显示

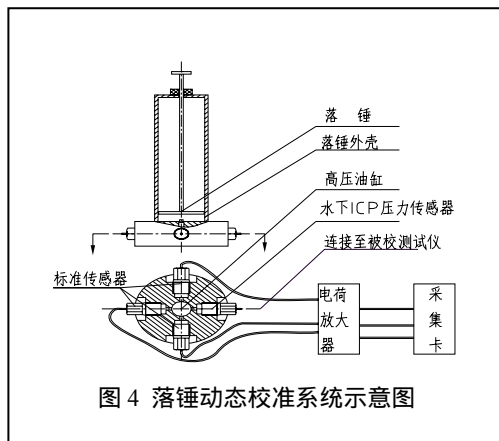


图 4 落锤动态校准系统示意图

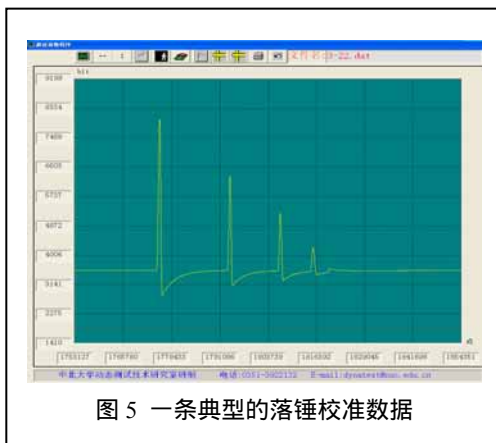


图 5 一条典型的落锤校准数据

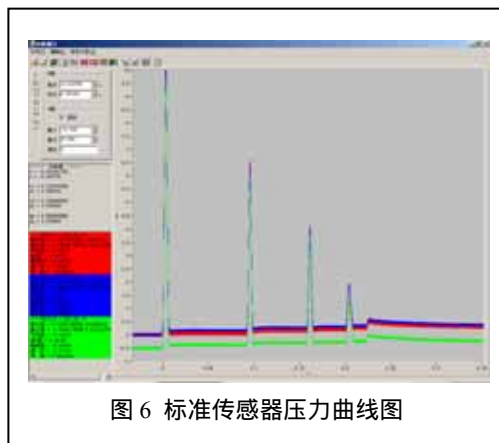


图 6 标准传感器压力曲线图

编程可调等特点,具有抗干扰性强和无需电缆引线的优点,特别适宜于大范围多测点的试验场合。微功耗、抗干扰水下爆炸冲击波超压测试系统大大提高了仪器的国际竞争力,为水下爆炸压力过程研究提供了可靠的技术支持,具有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] 张挺. 爆炸冲击波测量技术(电测法)[M]. 北京:国防工业出版社 1984
- [2] 许辉,文丰等.水下爆炸冲击波数据记录仪的设计与实现[J].传感器与仪器仪表,2007,23(1): 143~145.
- [3] Zamyshlyayev B V. Dynamic Loads in Underwater Explosions[Z], AD-757183, 1973.86-120.
- [4] 熊长汉.水下爆破冲击波压力测试技术[J].爆破.1994,11(3):11~14.

Design of low-power and changeable-frequency underwater data acquisition system

Yuan Bin^{1,2}, Zhao Qi³, Yang Zhuo-jing⁴, Dong Bing-yu^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement

Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China .2 .Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China.3. Shanxi Deep-hole Cutting Research Center of Engineering Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China.4. Centre for Hydrogeology and Environmental Geology , Chinese Geological Survey, Baoding 071051 , China)

Abstract The conception and characteristics of underwater blast shock wave and gas bubble pulsation theory are explained in this paper, based on which , the measuring principle and sampling parameters of the overpressure measuring system of underwater blast shock wave are figured out. The underwater blast pressure sensor,A/D converter, trigger control circuit, communication interface circuit , battery and other circuits are packaged in an airtight, water-proof and solid steel shell, which make up of a underwater blast shock wave measuring system working independently. This system has advantages of small size, low power consumption , high sampling frequency, anti-interference and no-need of cable, and is fit for large-scale multi-point

measurement in underwater.

Keywords: underwater explosions; blast shock wave; pressure; measurement

作者简介

原玢：中北大学电子测试技术国家重点实验室、仪器科学与动态测试教育部重点实验室，硕士，研究方向：动态测试与智能仪器

通讯地址：山西省太原市中北大学 407 信箱 邮编：030051

电邮：yuanbin19871987@126.com

赵奇：中北大学山西省深孔加工工程技术研究中心，硕士，研究方向：机械制造及其自动化

杨卓静：中国地质调查局水文地质环境地质调查中心，助理工程师，研究方向：地质灾害监测仪器

董冰玉：中北大学电子测试技术国家重点实验室、仪器科学与动态测试教育部重点实验室，硕士，研究方向：动态测试与智能仪器

读者服务卡编号 005