

doi: 10.7690/bgzdh.2023.09.016

# 战斗部传爆时序的存储测试

康晓晨, 辛佳昊

(西安近代化学研究所第十一研发部, 西安 710065)

**摘要:** 针对毁伤测试中存在的问题, 提出采用上电即采集的存储测试方法测量战斗部的传爆时序。通过解决输入信号抗干扰、测试装置状态反馈、在存储器中建立文件系统从而实现连续多次测量等关键技术, 实现对各个爆炸点爆炸探针信号的可靠采集和记录; 2 个爆炸探针输出信号上升沿之间的时间间隔即为两级爆炸之间的延时时间。试验结果表明: 该方法具有测试可靠、测试装置体积小、重量轻、携带方便、布设简单等优点, 可以推广到试验过程中多个瞬态事件之间时间的采集存储。

**关键词:** 爆炸探针; 传爆时序; 小型化存储测试; 文件系统; 状态反馈

**中图分类号:** TJ410.3<sup>+3</sup> **文献标志码:** A

## Storage Test of Warhead Detonation Sequence

Kang Xiaochen, Xin Jiahao

(No. 11 Research and Development Department, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Aiming at the problems existing in the damage test, a storage test method is proposed to measure the detonation time sequence of the warhead. By solving the key technologies of anti-interference of input signals, state feedback of the test device, and establishing a file system in the memory to realize continuous multiple measurements, the reliable acquisition and recording of the explosion probe signals of each explosion point are realized, and the time interval between the rising edges of the output signals of 2 explosion probes is the delay time between 2 explosions. The test results show that the method has the advantages of reliable test, small size, light weight, easy to carry and simple layout, and can be extended to the acquisition and storage of time between multiple transient events in the test process.

**Keywords:** explosive probe; detonation sequence; miniaturized storage test; file system; state feedback

## 0 引言

炸点精确控制是实现杀爆战斗部最佳毁伤威力的关键技术之一, 在战斗部研制过程中, 通常需要进行静爆性能试验, 测量战斗部的传爆时序(从触发开关闭合到引信输出药柱作用、战斗部接力药柱起爆、主装药爆炸之间的时间间隔)以及爆炸在战斗部周围形成的冲击波压力, 以获得引信瞬发度和战斗部综合瞬发度, 同时根据爆炸冲击波压力场数据对战斗部的毁伤威力进行评估。无线控制和存储测试技术已经广泛应用于冲击波压力测试中<sup>[1-2]</sup>, 但对于爆炸点之间的时间间隔测量通常还是采用爆炸探针、连接导线、数据采集设备的传统测量方法。这种测量方法由于连接导线长, 容易受到外部电磁环境的干扰而产生提前触发或者不触发的现象, 导致没有测量到有效数据, 达不到试验目的, 这是毁伤测试中“测不出、测不准、测不可靠”的难题<sup>[3-4]</sup>。笔者提出采用上电即采集的存储测试方法测量战斗部的传爆时序, 通过解决远距离供电控制、输入信

号抗电磁及爆轰干扰、测试系统状态反馈、在存储器中建立数据文件系统从而实现快速多次测量等关键技术, 避免了基于触发方式测试带来的误触发和不触发, 实现了战斗部传爆时序的可靠测试。靶场试验表明: 该方法具有操作方便、测试设备体积小、重量轻、便于携带、布设时间短、不存在误触发等优点, 测试结果可信, 可以推广到武器试验中任何多个瞬态事件的时间间隔测量中。

## 1 测试原理、系统组成与测试过程

### 1.1 测试原理

战斗部静爆试验时通常会在雷管和各级传爆药柱附近安装爆炸探针, 在战斗部头部安装碰合开关模拟引信触发信号, 结构如图 1 所示, 爆炸探针的引线从战斗部底端引出。用反弹道法使模拟靶板以一定的速度撞击战斗部头部的碰合开关, 引信控制部件识别到开关闭合后输出起爆能量引爆雷管, 雷管爆炸产生的等离子体使得雷管旁边的爆炸探针瞬间导通, 同时雷管爆炸使得引信的输出药柱爆炸,

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-06-05

作者简介: 康晓晨(1991—), 男, 陕西人。

进而使得战斗部的接力药柱爆炸，最终引爆战斗部主装药，每级药柱爆炸时都会使旁边的爆炸探针瞬时导通，只要测出每级爆炸探针的导通时刻，就可以得到战斗部各级药柱的传爆延时，进而获得战斗部的瞬发度。

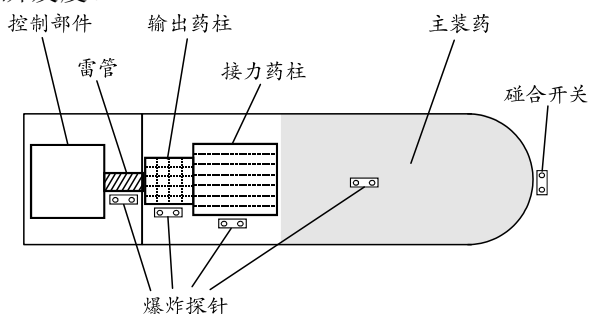


图1 战斗部静爆试验结构

传统测试方法采用在距战斗部较远的地方布置测试系统，通过导线将爆炸探针和碰合开关的引线连接到测试系统(测试系统通常在距战斗部30 m外的掩体内)，测试系统由碰合开关导通触发采集，触发后同时采集碰合开关和各个爆炸探针的信号。

笔者提出采用小型化存储测试装置测量碰合开关和爆炸探针的通断从而获得战斗部爆炸时序的方法。向碰合开关和爆炸探针的一端通过串联电阻施加8 V电压，另一端连接电路地，碰合开关和爆炸探针没有闭合时每个电阻下端的电压为8 V，碰合开关和爆炸探针闭合时电压为0，系统上电后小型化存储测试装置立即同步采集碰合开关和爆炸探针的输出电压(串联电阻下端的电压)，并将其实时存储在内部的Flash存储器中，试验后断电中止采集，读取采集的数据，通过处理就会在碰合开关和每个爆炸探针信号中得到一个顺序的负脉冲，负脉冲时序间隔即战斗部的传爆时序。无线监测采用MIMI芯片、ISM频段，体积小、功耗低，码率为200 kb。系统上电工作后，通过串口将工作状态(正在初始化、正在采集)和采集到电压抽点(采样率降为1 kHz)通过无线链路发送到远距离接电控制盒，同步上传到笔记本电脑实时显示工作状态。

## 1.2 系统组成

测试系统由多个爆炸探针、小型化存储测试装置、天线、远距离供电控制盒组成。系统组成如图2所示。小型化存储装置由32位ARM核单片机、Flash存储器、爆炸探针接口电路、电源管理电路、读数接口电路、可充电锂电池、无线发送模块组成，其原理如图3所示。

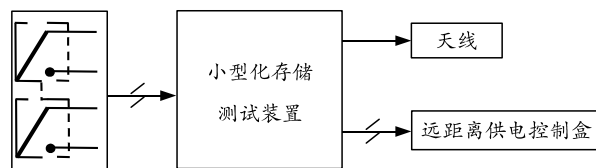


图2 测试系统组成

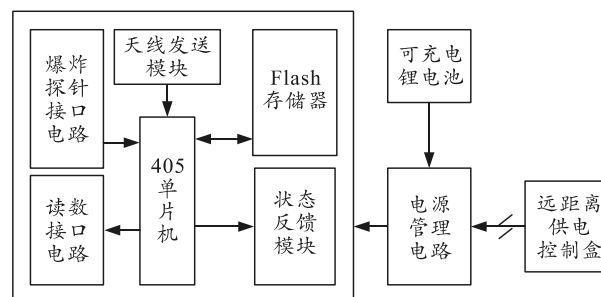


图3 小型化存储测试装置组成

爆炸探针由相距很近的顶端剥去绝缘层的2根漆包线构成，平时2根漆包线处于开路状态，当发生爆轰时周围空气电离使其两极瞬时处于短路状态。爆炸探针和引信触发开关一样是无源开关，测试时一端连接驱动电源，另一端连接到高速光耦的输入端，光耦输出端通过下拉电阻连接到单片机的AD输入端。爆炸探针平时处于开路状态，单片机的AD输入端为低电平，当爆炸发生时，单片机AD输入端为高电平。爆炸探针输出曲线的上升沿即为爆炸发生的开始时刻。

单片机选用STM32F405，该单片机内部集成了3个12位ADC，3个ADC可以设置成同步采样转换模式，每个ADC的转换速度可以达到2 MHz。将单片机内部ADC的转换速率设置为1 MHz，这样可以同时采集6个通道，3个同步通道之间的最大时间误差为1 μs，2个顺序采样通道之间的时间误差最大为2 μs<sup>[5]</sup>。存储器选用2片美光公司的16 G字节的NAND Flash，该芯片页面大小为8 640字节，一个页面的写时间最大为560 μs，这样写入速度为15.428 MB/s，大于ADC的采集速度1×6×1.5=9 MB/s。存储器总的容量为32 GB，一次写入的时间最长为3 500 s。单片机上电后开放10 s时间窗，在时间窗内从读数接口接收到有效的命令后，单片机进入读数工作模式，此时可以通过读数接口读取存储器中的数据、获取存储器中的数据文件个数、擦除存储器中的数据。如果10 s内没有接收到命令，则开始采集引信触发开关、爆炸探针的输出信号，直至断电，或者存储器已经存满。

电源管理电路一方面通过稳压电路将锂电池输出的电压转换成内部电路需要的电压，同时实现由

远距离供电控制盒控制内部电路的供电和断电，控制电路的原理如图 4 所示，当 A、B 之间输入 +5 V 触发信号时控制电路向小型化存储装置内部的电路供电，当 A、B 之间输入 -5 V 触发信号时切断小型化存储装置内部电路电源，触发信号宽度大于 10 ms 即可。

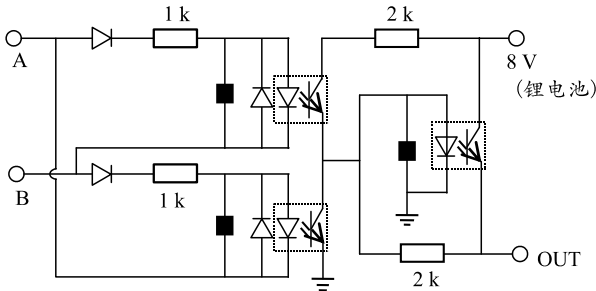


图 4 电源控制电路原理

小型化存储装置上电后，内部的无线发送模块每隔 1 s 发送其状态，首先发送上电初始化正常，进入采集后持续发送正在采集。远距离供电控制盒内部安装有触发电源和无线接收模块，面板上带有 2 个自复式电源控制开关和 2 个工作状态指示灯。2 个电源开关分别控制小型化存储装置的上电和断电，2 个指示灯点亮分别表示小型化存储装置已经上电并且初始化正常，正在采集爆炸探针输出信号。

### 1.3 测试过程

将小型化存储测试装置放入防护箱，埋在试验弹附近的地下，把引出的接插件和天线放在地面上，以便与爆炸探针、电源控制线连接。在引信输出药柱端面、战斗部接力药柱端面、战斗部主装药端面放置爆炸探针，每个爆炸探针通过 2 根导线连接到小型化存储测试装置。把远距离供电控制盒放置在安全距离外的掩体内，在掩体和小型化存储测试装置之间布设电源控制线。

将测试系统布设好以后，首先对测试系统连接状态进行测试，在掩体内操作电源控制盒向小型化存储测试装置上电，监测控制盒面板上的自检正常指示灯、正在采集指示灯是否点亮，以及点亮时机是否正常，采集 1 min 后将小型化存储测试装置断电。等待试验倒计时开始后再次控制小型化存储测试装置上电。上电后，人工记录小型化存储测试装置开始采集数据到战斗部作用的时间，以便读数时从合理的位置开始，减少读数的时间。

试验结束后，取出小型化存储装置，根据从采集数据到战斗部作用之间的时间，计算有效信号的存储位置，从该位置处读取 1 s 的数据进行分析。

相邻 2 路信号上升沿之间的时间间隔即为相邻两级爆炸点作用的时间间隔。

### 1.4 测试系统可靠性分析

影响测试可靠性的因素有爆炸探针与碰合开关、小型化存储测试装置与天线、测试装置与远距离供电控制盒之间的连线、远距离供电控制盒，其可靠性如图 5 所示，其中  $R_1$  为爆炸探针与碰合开关的可靠性， $R_2$  为小型化存储测试装置的可靠性， $R_3$  为测试装置与远距离供电控制盒之间的连线的可靠性， $R_4$  为远距离供电控制盒的可靠性。



图 5 测试系统可靠性

爆炸探针和碰合开关均采用成熟产品，爆炸探针在战斗部装药时预埋在内部，通过双点双线引出，碰合开关在试验现场安装在战斗部头部，也通过双点双线引出，根据以往试验统计结果其可靠性可达 0.999；测试装置与远端控制盒之间的连线采用线径大于 10 mm<sup>2</sup> 的双绞电缆，布设好后对其短路电阻和开路电阻进行测试，确认正常后才与小型化存储测试装置和远距离供电控制盒连接，其可靠性可以达到 0.999 99；小型化存储测试装置与天线和远距离供电控制盒为电子产品，在出厂前经历了高温老炼、温度循环等试验考核，可靠性能够达到 0.999 9；因此，测试系统的可靠性  $R=R_1 \times R_2 \times R_3 \times R_4=0.999 \times 0.999 99 \times 0.999 9 \times 0.999 9=0.998 79$ 。

## 2 抗干扰与连续测试技术

### 2.1 抗干扰技术

参与战斗部静爆试验的设备必须具备抗各类电磁干扰的能力。外场的电磁干扰主要包括空间偶发的辐射干扰和战斗部爆炸过程中产生的辐射干扰、通过测试导线的传导干扰。

采取将小型化存储测试装置放置在金属壳体内、无线收发模块与其余电路隔离的措施，将有效地屏蔽和隔离辐射干扰，确保内部电路可靠工作。在爆炸探针接口电路前端并联气体放电管、瞬态电压抑制器、Y 电容、限流电阻等器件组成多级防护电路，可以有效切断通过导线进入小型化存储测试装置内部的干扰。爆炸探针接口电路如图 6 所示。气体放电管为第 1 级防护电路，当输入端电压大于 50 V 时，气体放电管击穿，快速将输入端电压嵌位到 50 V 以下；瞬态电压抑制器为第 2 级防护电路，当两端电压达到 20 V 时，二极管击穿将两端电压嵌

位到 20 V 以下；Y 电容为第 3 级防护电路，可以将瞬态共模干扰快速释放大地。光偶输入端并联反向二极管进行保护，限流电阻确保回路中电流小于 10 mA。这些措施可以实现对爆炸探针输出信号真实可靠测试。

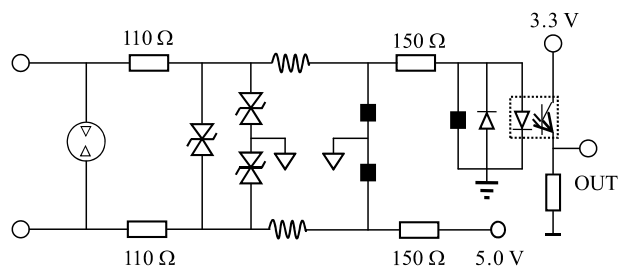


图 6 爆炸探针接口电路原理

## 2.2 连续测试技术

小型化大容量存储测试装置一般都采用 NAND Flash 存储芯片，在存储新的数据前需要擦除已经存储的数据。已有的大量小型化存储测试装置存储数据前需要擦除已经存储的数据，这种设计对于需要连续多次试验，或者试验过程中出现问题暂停后重新试验带来不便。如果能够在存储器中建立数据文件系统，就可以在不擦除的情况下多次记录数据，直到存储器被记满。建立数据文件系统需要解决：1) 保存每个数据文件的开始块号；2) 开始存储时准确快速搜索开始块号。

大容量 NAND Flash 芯片通常有 2 个片选信号，生产厂家保证每片的第 1 块可以进行 1 000 次的可靠写入和擦除，所以通常将坏块表保存在第 1 片第 1 块的第 1 页；将数据文件的开始块号保存在第 2 片第 1 块的第 1 页到第 32 页，第 1 页保存第 1 个数据文件的开始块号，第 2 页保存第 2 个数据文件的开始块号，这样依次保存后续数据文件的开始块号，执行擦除操作时将擦除所有的数据和文件信息。

为准确地获得数据文件的开始块号，在向每页写入数据时，将开始的 8 个字节写成固定值比如 0xcc、0xcc、0xcc、0xcc、0xcc、0xcc、0xcc、0xcc，这样写过数据的页前 8 个字节为设定的固定值，没有进行写操作的页必定为空标识 0xff、0xff、0xff、0xff、0xff、0xff、0xff、0xff，查找时只需读取每块第 1 页的前 8 个字节；若为空标识，进一步验证随后连续 8 块第 1 页前 8 个字节也为空标识，便可以确认该块即为将保存的数据文件的开始块，并将其写入相应的文件信息页。

为快速确定数据文件的开始块号，采用二分法

进行查找，这样在 2~8 192 的块号范围内，只需要最多读取 26 页的数据（同时读取片选 1、2 的数据）进行确认，如果每页的读取时间为 0.2 ms，查找到开始块号的时间大约为 6 ms。

## 3 试验结果

图 7 为某次战斗部静爆试验的测试曲线，曲线 1 为引信头部开关的测试曲线，曲线 2 为引信输出药柱处爆炸探针的测试曲线，曲线 3 为战斗部接力药柱处爆炸探针的测试曲线，曲线 4 为战斗部主装药处爆炸探针的测试曲线。曲线 1 和曲线 2 上升沿之间的时间为从引信开关闭合到其输出药柱作用的延时时间，该时间即为引信的瞬发度。曲线 2 和曲线 3 上升沿之间的时间间隔为引信输出药柱起爆到战斗部接力药柱起爆的延迟时间，曲线 3 和曲线 4 上升沿之间的时间间隔为战斗部接力药柱起爆到主装药起爆之间的延迟时间。曲线 1 上升沿到曲线 4 上升沿之间的时间间隔为战斗部的综合瞬发度。测到的各级爆炸点之间的时间间隔与理论预估基本吻合。

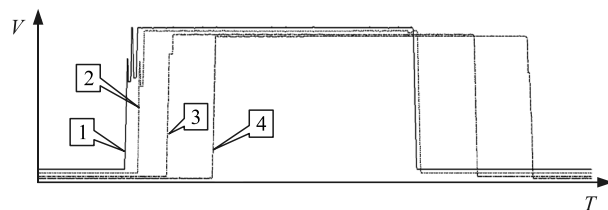


图 7 某战斗部静爆试验测试曲线

## 4 结论

笔者提出的战斗部传爆时序的测试方法与传统测试方法相比的优点：由于测试信号不需要经过长线传输、采用了上电立即记录的工作模式，避免了误触发的问题，确保了测试可靠性；测试设备体积小、重量轻，便于携带；现场布设时间短、操作方便。不足之处是试验完后需要从小型化记录器里读取数据，不能立即获取试验结果。与已有的存储测试方法相比，由于在存储器中建立了数据文件系统，不需要每次记录数据前擦除 Flash 芯片，解决了启动记录后由于试验暂停带来的需要擦除数据的问题；在存储测试装置中集成了无线发送模块，将其工作状态实时发送出来，对测试过程实时监测，进一步提高了测试的可靠性。试验结果表明：该方法操作方便、测试可靠，可以推广到其他多个瞬态事件间隔的测试中。