

# 具有高精度时空定位的动爆冲击波测试系统

徐泽辉, 秦建, 王玉, 王文廉

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 针对动爆环境下冲击波时空分布测量的高精度需求, 设计了一种基于全球导航卫星系统(GNSS)同步授时与实时动态(RTK)差分定位技术的高精度时空定位分布式测试系统。系统以FPGA为控制核心, 结合存储测试技术实现爆炸冲击波信号的自动记录, 并通过GNSS和RTK技术获取各测试节点的高精度时空信息, 以实现动爆冲击波的精确时空分布测量。对该系统进行了时间同步精度验证和现场爆炸试验。时间精度验证中, 不同测试节点的同步误差均在100 ns以内。在现场爆炸试验中, 布设了8个测试节点在不同位置进行数据采集, 每个节点通过RTK模块采集高精度的空间位置信息和时间数据, 实现了节点的实时位置跟踪和时间同步。试验结果显示, 沿爆炸物运动方向的节点超压峰值最高, 达到122.15 kPa, 垂直和反向方向的节点压力显著减弱。同时, 根据各节点记录的冲击波前沿到达时间, 冲击波传播速度在运动方向具有增强效应。本系统实现了动爆环境下冲击波的高精度时空分布测量, 具备厘米级空间定位精度和100 ns的时间同步精度。

**关键词:** 冲击波测试; 时空信息采集; RTK定位; 分布式传感网络

**中图分类号:** TN709 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.07.0023

**引用格式:** 徐泽辉, 秦建, 王玉, 等. 具有高精度时空定位的动爆冲击波测试系统[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 148-156.

XU Zehui, QIN Jian, WANG Yu, et al. Highly accurate spatio-temporal localization shockwave test system for dynamic explosive environments[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(2): 148-156.

## Highly Accurate Spatio-Temporal Localization Shockwave Test System for Dynamic Explosive Environments

XU Zehui, QIN Jian, WANG Yu, WANG Wenlian

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement(North University of China),  
Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the need of high precision measurement of shock wave spatio-temporal distribution in dynamic explosion environment, a high precision spatio-temporal positioning distributed test system based on Global Navigation Satellite System (GNSS) synchronous timing and Real-Time Kinematic (RTK) differential positioning technology was designed. The system used FPGA as the control core, and combined with memory test technology to realize the automatic recording of blast wave signal, and obtained the high-precision spatio-temporal information of each test node through GNSS and RTK technology to realize the accurate spatio-temporal distribution measurement of dynamic explosion wave. Time synchronization accuracy verification and field explosion test were carried out. In time accuracy verification, the synchronization errors of different test nodes were all within 100 ns. In the field explosion test, eight test nodes were set up at different locations for data acquisition. Each node collected high-precision spatial position information and time data through RTK

收稿日期: 2024-07-26

作者简介: 徐泽辉(1998—), 男, 硕士生, 主要从事动态测试技术与智能仪器仪表设计的研究。

通信作者: 王文廉(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事测试系统与仪器、信号与信息处理的研究。E-mail: wangwenlian@nuc.edu.cn.

module, which realized real-time position tracking and time synchronization of nodes. The test results show that the peak value of node overpressure along the direction of explosive movement is the highest, reaching 122.15 kPa, and the node pressure in the vertical and reverse directions is significantly weakened. At the same time, according to the arrival time of the shock wave front recorded by each node, the shock wave propagation velocity has an enhanced effect in the direction of motion. The system realizes high precision spatio-temporal distribution measurement of the shock wave in the dynamic explosion environment, with centimeter-level spatial positioning accuracy and 100 ns time synchronization accuracy.

**Key words:** shock wave testing; spatio-temporal information acquisition; RTK positioning; distributed sensor network

## 0 引言

随着科技的飞速发展和国防安全需求的增加,对动力学试验的关注不断提升<sup>[1]</sup>。其中,动爆试验需要对高能量物质爆炸时产生的冲击波进行分析,这对理解爆炸机理、评估材料性能以及研发新型防护设备具有重大意义<sup>[2-4]</sup>。动爆试验领域对于高精度、高可靠性测试系统的需求日益增长。由于爆炸物飞行速度和爆炸坐标的变化会使冲击波的时空分布变得复杂,因此获取完整、准确的冲击波传播数据面临极大的挑战<sup>[5-8]</sup>。

近年来,科研人员和工程师们已经提出了多种测试系统和方法<sup>[9-13]</sup>。周至柔等<sup>[9]</sup>对静爆和动爆产生的冲击波压力进行了实验测量和分析。通过对不同速度下的(580,703和717 m/s)动爆进行测试,获得了不同测量点的冲击波压力曲线和参数,并与理论计算的冲击波超压进行了比较。研究结果显示,动爆的冲击波压力分布具有强烈的方向性,且冲击波压力参数(包括超压、到达时间、持续时间和冲量)受到爆心移动速度、方向角和距离爆点的距离的影响。王明涛等<sup>[14]</sup>利用Autodyn仿真软件对运动爆炸下的柱形装药进行了仿真,并分析了空中自由场运动爆炸和垂直于目标迎爆面运动爆炸的典型工况。姬建荣等<sup>[15]</sup>利用激光高速摄影获得了静态和动态激波的初始变化图像,利用压力传感器获取了部分激波压力数据,通过分析阐明了装药运动速度对激波压力和三波点高度的影响。陈龙明等<sup>[16]</sup>利用Autodyn模拟计算了多个装药速度下爆炸冲击波的压力场。结果表明,超压峰值的大小沿方位角方向呈正弦曲线变化。

测试系统中,时空信息采集技术的应用是提高测试精度的关键,全球导航卫星系统(GNSS)技术的引入,提高了测试时间的同步精度,为动爆试验中的数据采集和分析提供了技术保障。但是,传统

的GPS定位技术由于其自身的限制,很难满足动爆试验的高精度要求<sup>[17]</sup>,同时在爆炸环境的分布式测试系统中完成冲击波信号的高精度时空分布测试也需要研制专用的测试设备<sup>[18]</sup>。为此,本文设计并研制了一种基于GNSS同步授时和实时动态差分定位(RTK)技术的高精度时空定位分布式测试系统,可实现对爆炸场内冲击波测点上 $p-t$ 曲线、时间、空间坐标以及毁伤评估的超压、持续时间和冲量等多参数的自动测试。

## 1 冲击波分析及系统设计

在动爆试验中,由于爆炸落点难以确定且弹药在爆炸时具有一定的运动速度,导致沿弹药运动方向的冲击波速度大于静爆冲击波速度,而沿运动方向相反方向的冲击波速度则小于静爆冲击波速度。同时,沿弹药运动方向上的冲击波超压会被显著增强,甚至可以达到几倍的增强,这种增强效应主要是由于弹药运动带来的动能叠加到了爆炸能量上。在垂直于弹药运动的方向上及与弹药运动相反方向上的冲击波超压则被减弱。此外,沿着弹药运动方向的冲击波超压峰值衰减速率较快,反之,在与弹药运动方向相反的方向上衰减速率较慢。具体效果如图1所示。

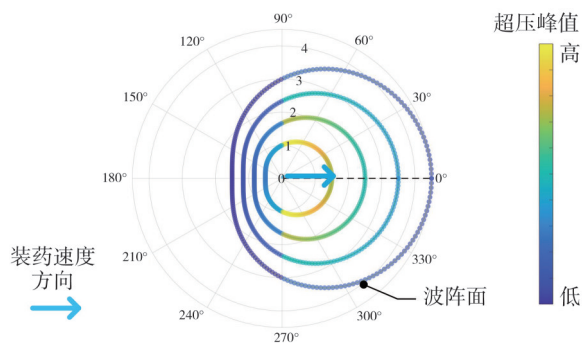


图1 动爆冲击波传播示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of shock wave propagation of dynamic detonation



满足触发条件时,系统采集存储一定长度的冲击波数据。同时,借助RTK定位模块的定位与授时功能,配合主控芯片实现高精度时空定位。

测试节点以FPGA芯片作为中心控制器,采用多线程工作模式同时控制各个模块并进行数据处理。A/D变换器将采集到的模拟信号转换为数字信号并传递给FPGA,FPGA对数字信号进行识别和判断,并通过控制存储模块完成冲击波信号的存储。同时,RTK模块向主控芯片发送时空

相关信息,主控芯片进行相应处理后获取并存储超压冲击波的时间信息及测试节点的位置信息。通过通讯模块,测试节点能够与上位机软件进行信息交互,从而实现远程状态检测和数据传输。

### 3 分布式测试节点时空信息采集

RTK通过观测卫星信号来实现高精度实时定位。测试网络结合RTK定位,可精确获取各测试节点的位置信息,具体如图4所示。

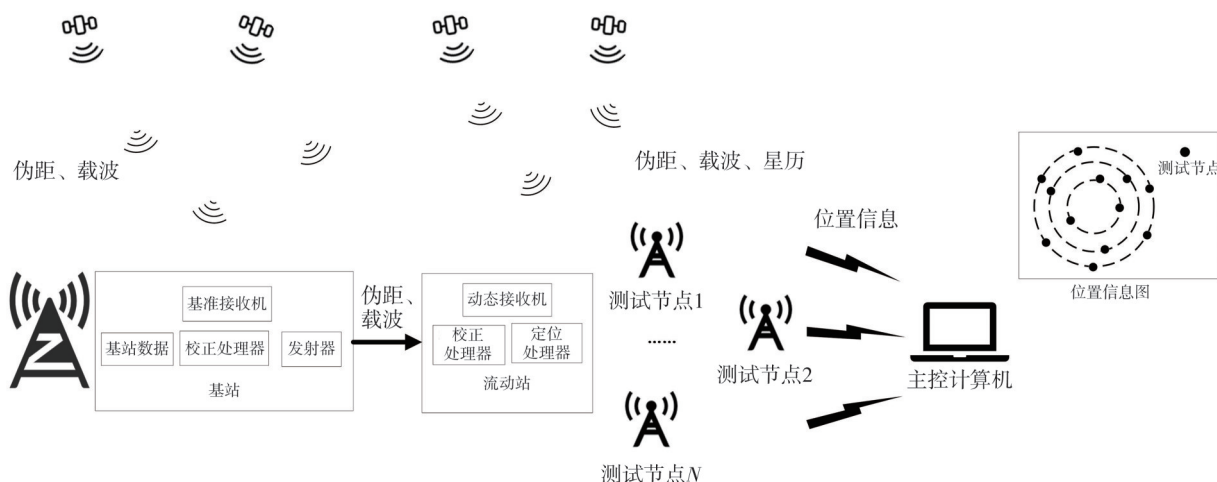


图4 基于RTK的测试节点空间定位原理

Fig. 4 Spatial positioning principle of test nodes based on RTK

为了对分布在爆炸场的各个测试节点进行精确定位,将流动站内置于测试节点中,并且建立基准站向流动站发送必要信息。选择在测点附近1km内建立基准站,通过实时电台建立基站和流动站之间的通讯,并保证数据稳定快速发送以完成精确定位。

RTK定位模块由GNSS接收机、电台通讯单元、数据处理单元和供电系统组成。自建基准站通过观测卫星生成格式为UBX的原始观测数据,并通过电台通讯设备实时将数据发送给流动站。流动站在接收卫星信号的同时,也接收基准站的电台信号。利用数据处理单元进行差分计算,从而精确地确定流动站的位置信息。FPGA主控芯片接收到流动站发送的报文信息后,对数据进行相应处理,并将精确的经纬度及海拔信息存储至测试节点。当接收到传输指令后,数据被传输至上位机,由上位机对测试节点的位置信息进行记录和还原。

在测试系统中,各个测试节点之间相互独立运行,为了精确获取爆炸冲击波到达各个时间节点的时间信息,需要设立统一的时间基准。这一基准通常通过全球导航卫星系统接收机接收到的

秒脉冲来实现。秒脉冲由RTK流动站中的GNSS接收机提供,通常与世界时(UTC)对齐,从而为测试节点提供一个高度精确的时间基准。通过将所有测试节点的时钟同步到GNSS接收机输出的秒脉冲,可以校准各个测试节点之间的时钟差异,从而确保整个测试系统的同步性。这种方法保证了在爆炸场等复杂环境中进行精确时间测量的可靠性,为数据分析和事件时间记录提供了可靠的基础。具体如图5所示。

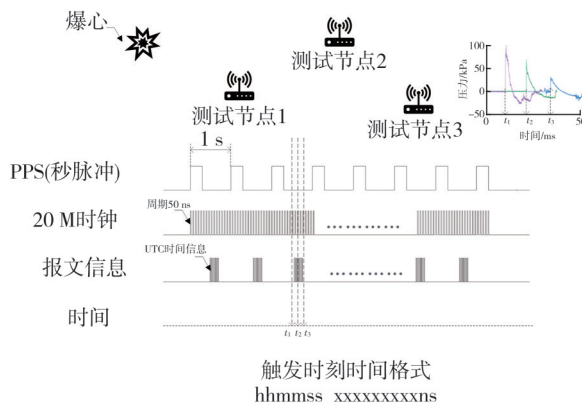


图5 冲击波绝对时间采集原理图

Fig. 5 Schematic diagram of absolute time acquisition of shock wave

GNSS接收机每秒输出一次秒脉冲,并通过异步收发器与主控芯片通信,以发送包含UTC时间信息的报文。主控芯片通过对报文进行解析获得UTC时间,并在接收秒脉冲时对UTC时间进行校准,以确保UTC时间信息的正确性。主控芯片通过晶振脉冲计数器进行精确时间的计算,每当接收到GNSS接收机发送的秒脉冲时,将计数值清零,未收到秒脉冲时则保持自增状态,以此获取精确的时间信息。当爆炸冲击波信号到达时

测试节点变为已触发状态,通过对计数值与UTC时间的结合处理将精确的时间信息存储下来。

### 4 实验及数据分析

#### 4.1 时间精度实验验证

采用实验来验证系统时间采集的准确性,原理如图6所示。对于时间精度与同步性验证采用外部触发的方式对3套测试节点进行同步触发测试,并记录触发时间。

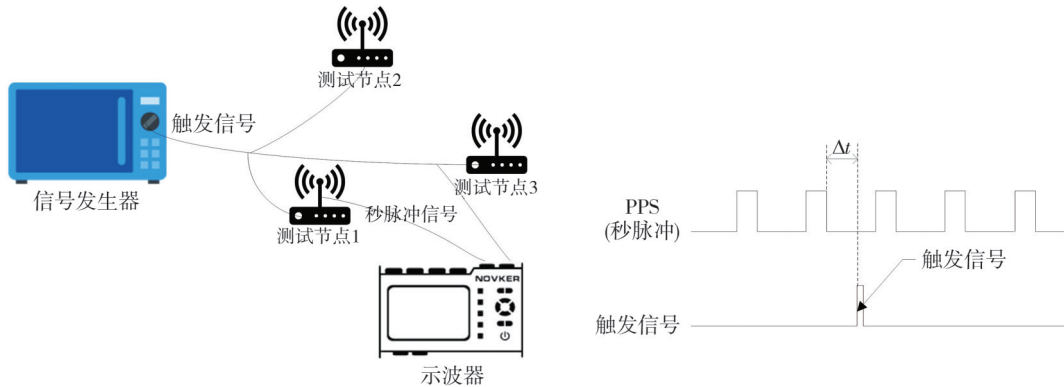


图6 时间精度测试原理图

Fig. 6 Schematic diagram of time accuracy test

以信号发生器为触发源并接入3个测试节点,将测试节点中的秒脉冲信号以及触发信号线接入示波器进行监测。当触发源发出触发信号时,测试节点记录下触发时间,同时示波器监测到触发信号后可以计算出触发信号与上一个秒脉冲到达的时间差值 $\Delta t$ ,与测试设备的触发时间作比较来验证时间精度。测试结果如表1所示。

可靠性,进行了现场爆炸测试。将测试节点布置在图7所示位置。

以距地面1.6 m高度的靶板为目标发射炮弹,以预测爆心为原点,将8个测试节点布置如下:节点2、4、5、7位于与爆心距离8 m的 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 方向,节点1、3、6、8位于与爆心距离11.31 m的 $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $315^\circ$ 方向。所有传感器的敏感面均与地面持平。测试前,根据爆炸当量和测试距离计算触发阈值,确保系统在冲击波压力信号作用下能够准确触发,同时保证足够的冗余量以避免误触发。8个测试节点参数设置如表2所示。

表1 时间同步测试结果

Tab. 1 Time synchronization test results

实验次序	$\Delta t$ /ns	测试节点	触发时刻
第1次	361 037 136	1	10:35:24.361 037 200
		2	10:35:24.361 037 150
		3	10:35:24.361 037 200
第2次	409 228 029	1	11:04:22.409 228 050
		2	11:04:22.409 228 150
		3	11:04:22.409 228 050
第3次	279 564 378	1	11:27:39.279 564 400
		2	11:27:39.279 564 450
		3	11:27:39.279 564 450

分析表1数据可知,时间差值 $\Delta t$ 与测试设备记录的触发时间差均在100 ns以内,且各套设备之间记录的时间误差最大为100 ns,证明时间信息的准确性较高。

表2 测试前参数设置表

Tab. 2 Pre-test parameter setting table

测试节点	触发压力值/kPa	采样频率/MHz	增益倍数
1	7.10	1	2
2	14.00	1	2
3	7.10	1	2
4	14.00	1	2
5	14.00	1	2
6	7.10	1	2
7	8.00	1	2
8	11.31	1	2

试验时由火炮发射战斗部,战斗部爆炸时速度约为800 m/s。爆炸后读取存储记录数据获得测试节点的时空信息,结果如表3所示。

#### 4.2 现场试验验证

为了验证系统定位精度及各功能的稳定性和

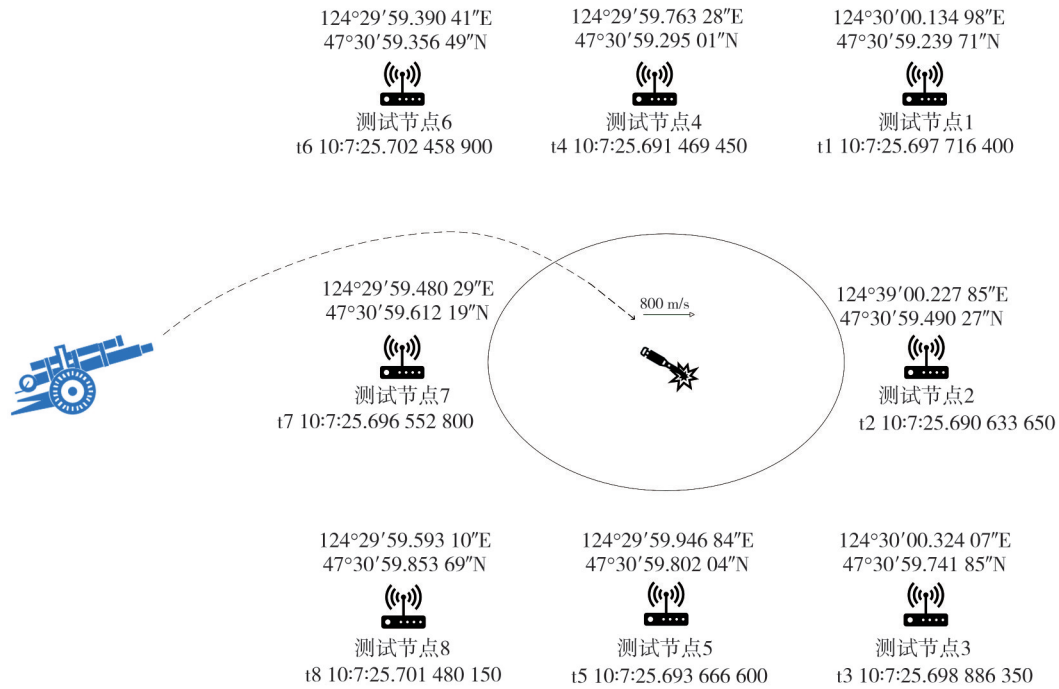


图 7 动爆实验原理及现场布置图

Fig. 7 Dynamic explosion experiment principle and site layout

表 3 测试节点时空信息表

Tab. 3 Test node space-time information table

测试节点	大地坐标		冲击波前沿时刻
	经度	纬度	
1	124°30'00.134 98"E	47°30'59.239 71"N	10:7:25.697 716 400
2	124°30'00.227 85"E	47°30'59.490 27"N	10:7:25.690 633 650
3	124°30'00.324 07"E	47°30'59.741 85"N	10:7:25.698 886 350
4	124°29'59.763 28"E	47°30'59.295 01"N	10:7:25.691 469 450
5	124°29'59.946 84"E	47°30'59.802 04"N	10:7:25.693 666 600
6	124°29'59.390 41"E	47°30'59.356 49"N	10:7:25.702 458 900
7	124°29'59.480 29"E	47°30'59.612 19"N	10:7:25.696 552 800
8	124°29'59.593 10"E	47°30'59.853 69"N	10:7:25.701 480 150

表 3 中测试节点的经纬度数据采用度分秒格式,其中秒值精确到小数点后 5 位,经换算后精度约  $10^{-7}^{\circ}$ ,符合厘米级定位的要求。对实验所得的节点坐标进行处理,将所得各测试节点之间的相对位置与实验预布置的节点位置进行比较,误差不超过 10 cm。由上位机读取测试节点存储记录

的冲击波曲线并进行处理后得到超压曲线,如图 8 所示。

冲击波传播到地面时会发生反射,形成反射激波。由某些节点的冲击波压力曲线可以观察到典型的二次反射激波现象。对冲击波压力曲线的分析与处理可获得冲击波的峰值、持续时间和比冲量,结果见表 4。

表 4 测试节点超压峰值

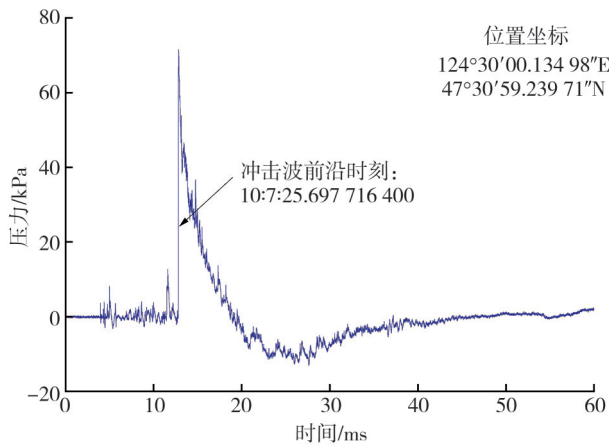
Tab. 4 Test node overpressure peak

测试节点	超压峰值/kPa	持续时间/ms	比冲量/(Pas)
1	74.612 2	4.647	125.282 1
2	122.151 0	4.205	213.265 4
3	74.231 9	4.615	131.049 5
4	86.449 9	4.595	128.926 9
5	73.104 0	4.712	116.246 7
6	23.370 8	5.341	46.994 9
7	32.742 5	5.421	23.424 1
8	24.989 4	5.369	48.589 9

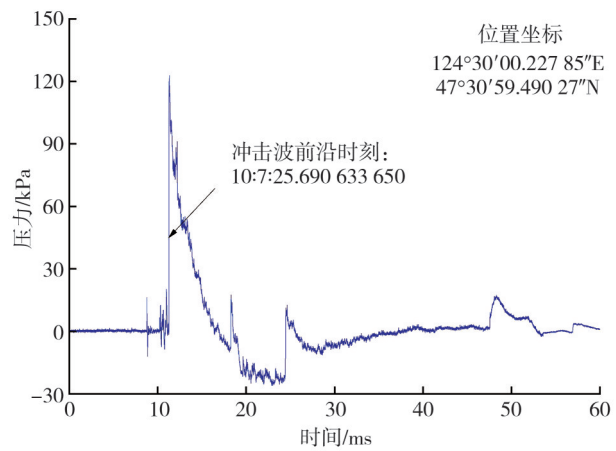
由图 8 和表 4 可知,在 8 个测试节点中,位于战斗部运动方向一侧的测试节点的超压峰值明显大于位于两侧及运动方向相反一侧的测试节点。同时,位于战斗部运动方向上的测试节点 2 的超压峰值最大为 122.15 kPa。可以看出,沿弹药运动方向上冲击波超压会被显著增强,而在垂直弹

药运动方向及与弹药运动相反方向上的冲击波超压则被减弱。同时,根据表3中冲击波前沿到达各测试节点的时间先后顺序可以看出,沿战斗部

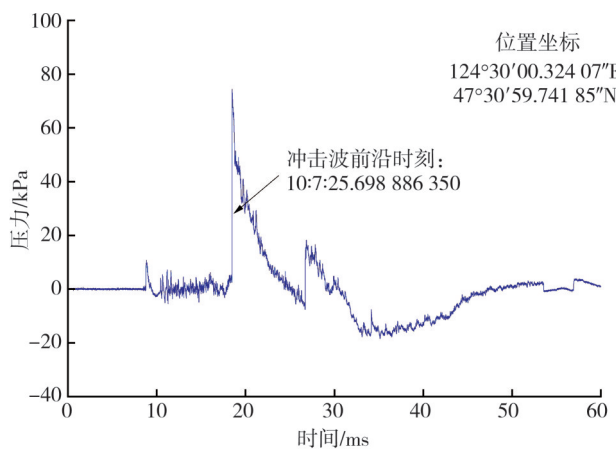
运动方向的冲击波传播速度大于两侧及相反方向的传播速度。在动爆测试中高精度的时空信息有助于更好地分析动爆冲击波的传播规律。



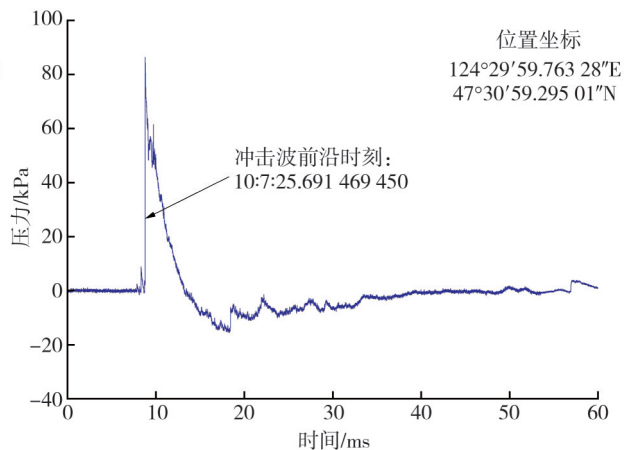
(a) 测试节点1



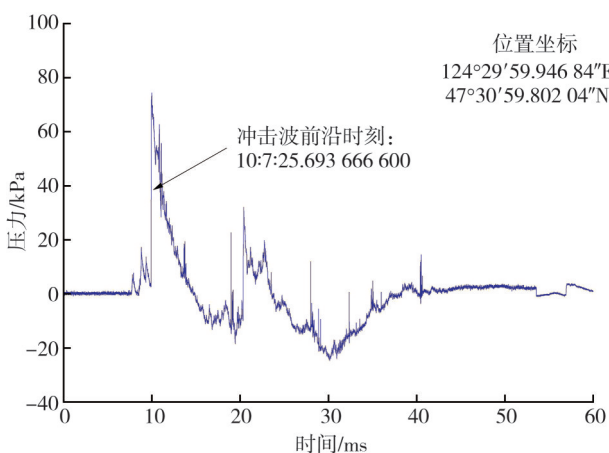
(b) 测试节点2



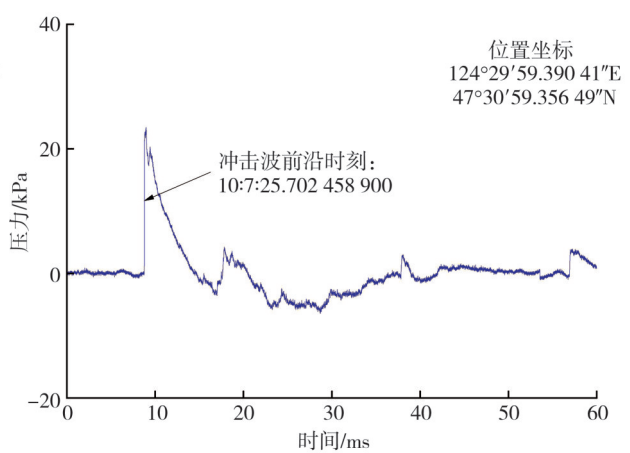
(c) 测试节点3



(d) 测试节点4



(e) 测试节点5



(f) 测试节点6

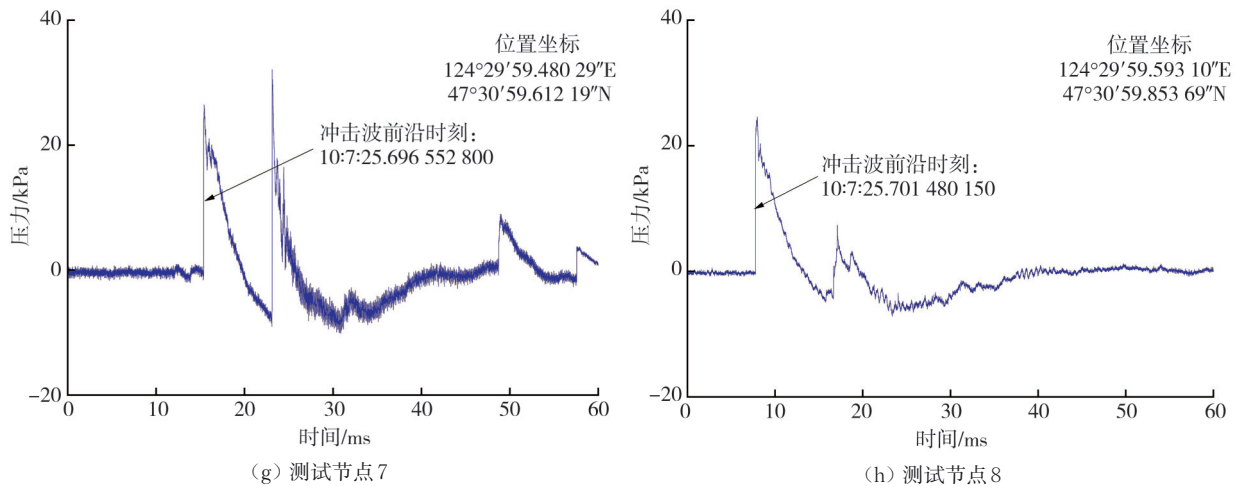


图 8 冲击波记录曲线图

Fig. 8 Shock wave recording curve

## 5 结 论

在动爆试验中,冲击波特性的精确测量对于分析爆炸效应至关重要。为此,本文结合实时动态定位技术和冲击波传感器,构建了一种基于RTK技术的高精度时空定位冲击波分布式测试系统。分布式冲击波测试节点作为GNSS时空定位系统中的移动站,可以获得冲击波到来时刻的绝对时间和坐标信息。动爆试验结果表明,该系统可以获得100 ns和厘米精度上的冲击波时空分布。

### 参考文献:

- [1] 畅博,谷鸿平,牛晨伟,等.运动炸药近地爆炸冲击波场特性研究[J].爆破,2018,35(3):49-54.  
CHANG Bo, GU Hongping, NIU Chenwei, et al. Characteristics investigation on shock wave field of near ground blasting of moving explosive charge [J]. Blasting, 2018, 35(3): 49-54. (in Chinese)
- [2] 徐其鹏,李芝绒,陈君,等.地形对地面爆炸空中冲击波传播规律的影响[J].兵工学报,2020,41(S2):96-101.  
XU Qipeng, LI Zhirong, CHEN Jun, et al. Influence of topography on propagation law of air shock wave in ground explosion [J]. Acta Armamentarii, 2019, 41(S2): 96-101. (in Chinese)
- [3] 冯海云,胡宏伟,肖川,等.两点阵列爆炸威力场分布及增益研究[J].火炸药学报,2020,43(3):345-350.  
FENG Haiyun, HU Hongwei, XIAO Chuan, et al. Research on the blast power field distribution and gain of two-point array explosion [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2020, 43(3): 345-350. (in Chinese)

- [4] 何翔,杨建超,王晓峰,等.常规战斗部动爆威力研究综述[J].防护工程,2022,44(1):1-9.  
HE Xiang, YANG Jianchao, WANG Xiaofeng, et al. Overview of conventional warhead dynamic explosion power research [J]. Protective Engineering, 2022, 44(1): 1-9. (in Chinese)
- [5] 王守仁,马荣华,于寅业,等.爆震弹近地动爆冲击波超压非致命特性研究[J].中北大学学报(自然科学版),2022,43(2):122-128.  
WANG Shouren, MA Ronghua, YU YinYE, et al. Non-lethal characteristics of overpressure of near-earth dynamic detonation shock wave of detonation grenade [J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2022, 43(2): 122-128. (in Chinese)
- [6] 赖富文,王文廉,张志杰.大当量战斗部爆炸冲击波测试系统设计及应用[J].弹箭与制导学报,2009,29(3):133-135.  
LAI Fuwen, WANG Wenlian, ZHANG Zhijie. Design and application of test system for blast wave [J]. Journal of Projectiles Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(3): 133-135. (in Chinese)
- [7] 王文廉,张晋文,赵晨阳,等.爆炸场压力测试多存少取技术研究[J].振动与冲击,2014,33(24):54-57.  
WANG Wenlian, ZHANG Jinwen, ZHAO Chenyang, et al. Mass storage and less read technology for pressure measurement of an explosion field [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(24): 54-57. (in Chinese)
- [8] 武江鹏,贺翮,闫振纲,等.基于背景纹影技术的战斗部静动爆冲击波关联性研究[J].兵器装备工程学报,2021,42(7):62-67.  
WU Jiangpeng, HE Xuan, YAN Zhengang, et al.

- Research on shock wave correlation of warhead static and dynamic explosion using background-oriented schlieren imaging[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(7): 62-67 (in Chinese)
- [9] 周至柔, 蒋海燕, 苏健军. 动爆冲击波场空间位置分布规律研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(2): 15-21. ZHOU Zhirou, JIANG Haiyan, SU Jianjun. Study on spatial position distribution of a dynamic detonation shock wave field[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(2): 15-21 (in Chinese)
- [10] 钞红晓, 胡浩, 雷强, 等. 基于地震波触发的战斗部动爆冲击波试验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(8): 105-113. CHAO Hongxiao, HU Hao, LEI Qiang, et al. Experimental study on shock wave from dynamic explosion of a warhead based on seismic wave triggering[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(8): 105-113. (in Chinese)
- [11] 蒋海燕, 李芝绒, 张玉磊, 等. 运动装药空中爆炸冲击波特性研究[J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 286-294. JIANG Haiyan, LI Zhirong, ZHANG Yulei, et al. Characteristics of air blast wave field for explosive charge moving at different velocities[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 286-294. (in Chinese)
- [12] 丁永红, 尤文斌, 马铁华. 舰用动爆冲击波记录系统的设计与应用[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(2): 194-199. DING Yonghong, YOU Wenbin, MA Tiehua. Design and application of a shock wave recorder used in warship subjected to dynamic explosive[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(2): 194-199. (in Chinese)
- [13] 田壮, 杜红棉, 祖静, 等. 战斗部动爆冲击波存储测试方法研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33(3): 66-69. TIAN Zhuang, DU Hongmian, ZU Jing, et al. Test method of dynamic explosion shock wave[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(3): 66-69. (in Chinese)
- [14] 王明涛, 程月华, 吴昊. 柱形装药空中运动爆炸冲击波荷载计算模型[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(7): 107-125. WANG Mingtao, CHENG Yuehua, WU Hao. Calculation model for the blast wave load by explosion of air-moving cylindrical charges[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(7): 107-125. (in Chinese)
- [15] 姬建荣, 苏健军, 陈君, 等. 动爆冲击波传播特性实验研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(12): 20-24. JI Jianrong, SU Jianjun, CHEN Jun, et al. Experimental study on propagation characteristics of dynamic blast wave[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(12): 20-24. (in Chinese)
- [16] 陈龙明, 李志斌, 陈荣. 装药动爆冲击波特性研究[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(1): 74-82. CHEN Longming, LI Zhibin, CHEN Rong. Characteristics of dynamic explosive shock wave of moving charge[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(1): 74-82. (in Chinese)
- [17] 袁运斌, 侯鹏宇, 张宝成. GNSS非差非组合数据处理与PPP-RTK高精度定位[J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1225-1238. YUAN Yunbin, HOU Pengyu, ZHANG Baocheng. GNSS undifferenced and uncombined data processing and PPP-RTK high-precision positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1225-1238. (in Chinese)
- [18] 张想平, 杨明光. 惯导RTK技术的定位原理和工程应用实践[J]. *全球定位系统*, 2022, 47(3): 109-113. ZHANG Xiangping, YANG Mingguang. Positioning principle and engineering application practice of inertial navigation system RTK technology[J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(3): 109-113. (in Chinese).