

文章编号: 1006-7051(2024)06-0120-09

# 二氧化碳致裂器高精度延时起爆系统

齐益浩<sup>1</sup>, 王玉峰<sup>1</sup>, 徐振洋<sup>2</sup>, 姜天燃<sup>1</sup>, 王勇<sup>1</sup>

(1. 辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁鞍山 114051; 2. 辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁鞍山 114051)

**摘要:** 针对传统起爆系统发火能量差、起爆时间精度低等问题, 研发了应用于二氧化碳致裂器的高精度延时起爆系统。采用反激拓扑结构的起爆电源对起爆系统外部锂电池提供的 12 V 直流电压进行升压变换, 并将转换后的能量集中储存在起爆电容中, 起爆电容可迅速放电, 为二氧化碳致裂器发热装置提供高密度的发火能量; 采用 BP 神经网络算法对起爆系统的起爆开关动作时间进行精准时间校正, 提高了起爆系统的起爆时间精度。结果表明, 起爆系统同步起爆时间误差、顺序起爆时间误差均可控制在 1.5 ms 内, 起爆电源放电电流可达 35 A 以上, 可满足二氧化碳致裂器对起爆系统起爆时间精度以及发火能量需求, 从而进一步提高爆破的安全性。

**关键词:** 二氧化碳; 相变致裂; 起爆系统; 起爆电源; BP 神经网络算法

**中图分类号:** TP23 **文献标志码:** A **doi:** 10.19931/j. EB. 20240017

## High-precision delayed initiation system for carbon dioxide fracturing device

QI Yi-hao<sup>1</sup>, WANG Yu-feng<sup>1</sup>, XU Zhen-yang<sup>2</sup>, JIANG Tian-ran<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Information, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China; 2. College of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low ignition energy and low accuracy of detonation time in traditional detonation systems, a high-precision delayed detonation system applied to carbon dioxide fracturing devices has been developed. The detonation power supply adopts a flyback topology structure to boost and transform the 12V DC voltage provided by the external lithium battery of the detonation system, and store the converted energy in the detonation capacitor. The detonation capacitor can quickly discharge, providing high-density ignition energy for the carbon dioxide cracking device heating device; The use of BP neural network algorithm for precise time correction of the detonation switch action time of the detonation system has improved the detonation time accuracy of the detonation system. The results show that the synchronous detonation time error and sequential detonation time error of the detonation system can be controlled within 1.5 ms, and the discharge current of the detonation power supply can reach more than 35 A, which can meet the accuracy of the detonation

**收稿日期:** 2024-03-26

**基金项目:** 中央引导地方科技发展资金资助项目(2023JH6/100400022)

**作者简介:** 齐益浩(1996—), 男, 在读硕士, 从事爆破工程技术方面的研究。E-mail: letcqiylhao@163.com

**通信作者:** 王玉峰(1981—), 男, 博士, 副教授, 从事电磁兼容方面的研究。E-mail: wangyufeng@ustl.edu.cn

**引用本文:** 齐益浩, 王玉峰, 徐振洋, 等. 二氧化碳致裂器高精度延时起爆系统[J]. 工程爆破, 2024, 30(6): 120-128.

QI Yi-hao, WANG Yu-feng, XU Zhen-yang, et al. High-precision delayed initiation system for carbon dioxide fracturing device [J]. Engineering Blasting, 2024, 30(6): 120-128.

time and ignition energy requirements of the carbon dioxide fracturing device for the detonation system, thereby further improving the safety of blasting.

**Key words:** carbon dioxide; phase change fracturing; initiation system; initiation power supply; BP neural network algorithm

二氧化碳相变致裂技术是利用气体相变原理进行爆破的一种方法,广泛应用于破冰应急领域,可利用二氧化碳在相变过程中释放的能量迅速打开冰封的海域或河流通道<sup>[1-3]</sup>。二氧化碳致裂器是二氧化碳相变致裂技术的主要机械设备,其内部发热装置性能日趋稳定,可实现高压脉冲起爆器点燃,从而使其内部液态二氧化碳瞬间气化,产生高压气体对周围介质做功,实现爆破效果<sup>[4-6]</sup>。

目前,国内外工业技术发展日新月异,对于起爆系统的研究,发展到了一个新的高度。刘庆等<sup>[7]</sup>设计的遥控导爆管起爆系统发火能量稳定性高,无线起爆距离可达 400 m 以上。迟洪鹏等<sup>[8]</sup>研发的无线遥控地下起爆系统拥有极高的可靠性,对井下爆破的发展具有重要意义。尹国福等<sup>[9]</sup>设计了基于 RS485 总线的可寻址起爆系统,通过实验证明,该系统具备智能化与可靠性优势。李泽华等<sup>[10]</sup>以 Visual C++ 为开发平台,采用 MFC 框架,结合 OpenGL 三维引擎,在三维环境中实现了布孔和爆破网路设计,取得了较好的爆破效果。梁车平等<sup>[11]</sup>针对 EFP 战斗部多点起爆系统,设计了同步起爆网路,通过实验验证,起爆系统的同步性与每组雷管之间的等效电阻及等效电感等参数有关。王波等<sup>[12]</sup>研究探讨了一种用于电雷管爆破、导爆管雷管爆破以及 CO<sub>2</sub> 爆破的装配式激发管末端管控起爆系统,以解决爆破作业现场爆破器材的使用监管问题。韩克华等<sup>[13]</sup>基于爆炸同步网络技术,冲击片雷管技术设计了多点同步起爆网络,实验表明,影响冲击片雷管多点同步起爆系统同步时间的主要因素是雷管参数、发火能量裕度、各支路的等效参数等。Jatin C 等<sup>[14]</sup>为实现安全爆破的灵活性,设计了一种基于 Wi-Fi 的无线爆破系统。高飞等<sup>[15]</sup>研发设计出远程多路起爆系统,该系统可在 500~1 500 m 的水平距离区间远程遥控 10 台起爆装置,完成储能、多路起爆、数据采集、电能泄放操作,每台起爆装置起爆

能力可实现 100 发雷管,起爆成功率为 100%。

针对上述研究,为提高现有起爆系统的发火能量以及起爆时间精度,依据二氧化碳致裂器起爆原理以及爆破现场实际工况,研发出了一种应用于二氧化碳致裂器的高精度延时起爆系统。该系统可大幅度地降低爆破地震效应,从而进一步提高爆破的安全性。

## 1 起爆系统起爆控制时序

起爆系统采用无线射频通信技术进行数据传输,为避免在起爆电源升压变换启动以及高压放电的过程中对通信造成干扰,在电路设计方面采用滤波、屏蔽等方式进行有效防护处理的同时,需制定合理的工作时序。由于起爆系统在高压放电过程中处于起爆输出状态。因此,为不影响起爆输出,起爆系统主从机之间的通信需避开最强电磁干扰状态。为此,起爆信号需在起爆系统从机起爆前发送至各个从机,从时域上避开最强电磁干扰信号,保证起爆系统起爆输出的可靠性,起爆系统工作时序如图 1 所示。

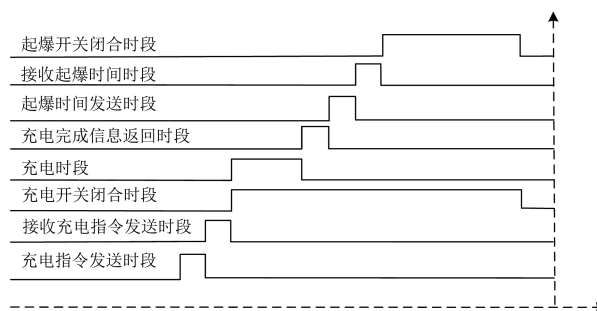


图 1 起爆系统工作时序

Fig. 1 Timing of the initiation system operation

起爆系统的起爆控制时序为:主机将充电信号发送至从机,从机接收到充电指令后,闭合充电开关进行充电,充电完成后,将允爆信号返回至主机。主机将起爆时间预先传送至从机,当 GPS 接收机接收到的时间信息达到预设时间时,执行起爆输出操作。

## 2 起爆系统硬件设计

### 2.1 起爆系统硬件结构

起爆系统由一个主机及多个从机构成,起爆系统硬件整体结构如图 2 所示,人机界面方便了操作人员对起爆系统的操作,与微处理器采用 USART 串口进行数据传输;主机与从机采用 NRF24L01 无线通信模块进行数据传输,保证数据传输效率;温度采样电路以及电磁继电器驱动

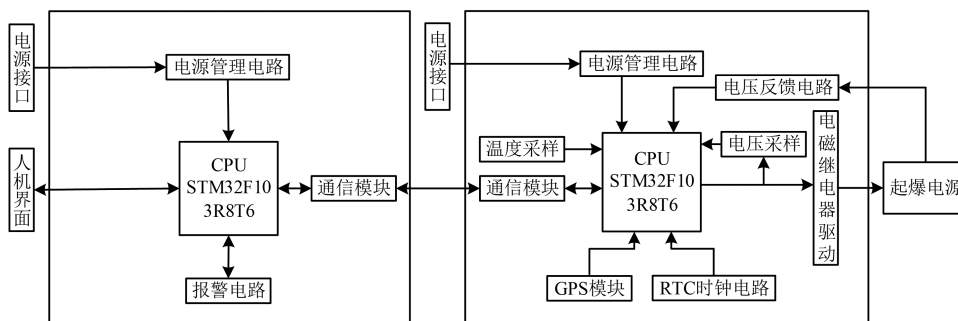


图 2 起爆系统硬件整体结构

Fig. 2 Overall hardware structure of the initiation system

### 2.2 起爆电源设计

基于反激拓扑结构设计起爆电源,其主要由 DC/DC 升压电路、隔离反馈电路、储能电容、整流电路等组成。并具有输出电压可调、可靠性高、体

电压采样电路,为 BP 神经网络自适应时间矫正模型提供实时环境温度信息以及电磁继电器驱动电压信息;GPS 模块与 RTC 时钟保证起爆系统从机拥有相同高精度的时间零点;起爆电源的充放电由起爆开关电磁继电器进行控制,当从机接收起爆信号后,起爆开关电磁继电器动作后,起爆电源可释放脉冲电流,使二氧化碳致裂器发热装置瞬间点燃。

积小等优势,可根据不同致裂器发热装置对燃烧阈值的灵敏度,对起爆电源输出电压进行调整,提高了致裂器起爆控制的灵活性,其硬件结构如图 3 所示。

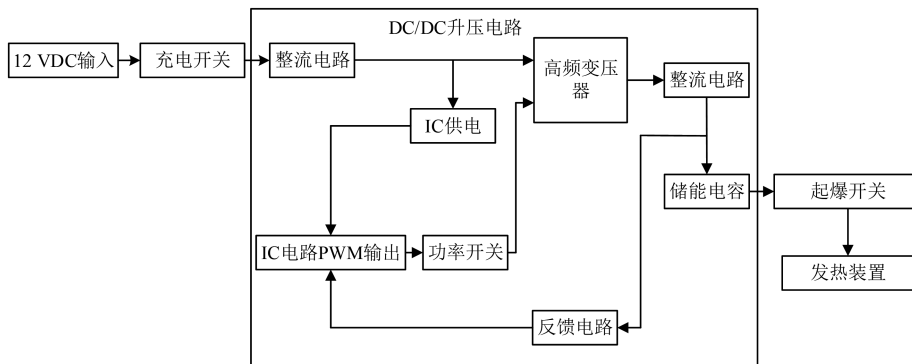


图 3 起爆电源硬件结构

Fig. 3 Hardware structure of initiation power supply

## 3 起爆系统软件设计

### 3.1 基于 BP 神经网络的自适应时间校正算法设计

1)BP 神经网络算法原理。BP 神经网络算法

是一种基于梯度下降的训练算法,首先通过前向传播将输入数据在网络中逐层传递并产生预测结果。然后通过反向传播算法计算预测误差,并根据误差信息调整网络中各个神经元之间的连接权重,不断迭代更新权重,以最小化预测值与真实值

之间的误差,从而提高网络的预测能力<sup>[16-18]</sup>。

2)输入输出向量的选取。起爆开关电磁继电器吸合时间的影响因素主要有驱动电压、环境温度及老化磨损等<sup>[19]</sup>。由于老化磨损是一个缓慢变化的过程,且随吸合次数的增加成上升趋势,在一定时间范围内此部分的影响相比环境温度和驱动电压要小得多。因此,当电磁继电器吸合时间预测误差高于 1 ms 时,采用反向传播算法更新训练模型的方法来改善老化磨损因素对电磁继电器吸合时间的影响。为此,BP 神经网络自适应时间校正算法模型的输入向量由驱动电压、环境温度 2 个要素构成。由于最终目的是获取电磁继电器的吸合时间,因此,输出向量即为电磁继电器的吸合时间。

3)训练样本预处理。在实际工况下,对起爆系统进行模拟实验,分别采样在不同驱动电压及环境温度下的电磁继电器吸合时间,构成训练样本。对训练样本进行归一化处理,可以有效提高神经网络的训练效果和泛化能力,处理后的部分数据如表 1 所示。

表 1 归一化数

Table 1 Standardized

电压	温度	动作时间	温度	动作时间	温度	动作时间
0.14	0.16	0.47	0.48	0.56	0.82	0.58
0.23	0.16	0.43	0.48	0.53	0.82	0.41
0.34	0.16	0.35	0.48	0.39	0.82	0.35
0.44	0.16	0.31	0.48	0.37	0.82	0.32
0.56	0.16	0.23	0.48	0.21	0.82	0.27

4)隐含层设计。由于普通 MCU 算力有限,故将计算机作为起爆系统的上位机,实现起爆系统与计算机互联,利用 Python 语言编程建立 BP 神经网络电磁继电器自适应时间校正模型,采用 Relu 激活函数,网络权值初始化为随机初始化,采用 Adam 优化算法,设置多组不同的隐含层数,将训练样本数据按 6 : 2 : 2 比例随机划分为训练集、验证机和测试集,每组参数调试均经过 20 次实验,取 20 次实验的验证集及测试集评价指标平均值验证模型精度。部分具有代表性的训练结果如表 2

所示。

表 2 不同隐含层数模型表现结果

Table 2 Performance results of models with different hidden layer numbers

模型网路结构	训练集均方误差	训练集决定系数	验证集均方误差	验证集决定系数
B2T10	0.227 4	0.969 7	0.256 2	0.965 6
B2T20	0.209 3	0.972 4	0.247 9	0.969 2
B2T25	0.211 2	0.975 1	0.247 3	0.971 4
B3T10	0.222 6	0.976 7	0.253 1	0.974 2
B3T20	0.208 4	0.979 6	0.247 6	0.976 3
B3T25	0.203 0	0.980 6	0.245 9	0.977 6
B4T10	0.210 9	0.979 1	0.254 7	0.973 9
B4T20	0.207 7	0.979 7	0.255 7	0.973 7
B4T25	0.204 7	0.980 3	0.253 7	0.974 1

表 2 中,B 为模型的隐含层数,T 为每个隐含层所包含的神经元数。通过表 2 可知,当隐含层层数为 2 层时,模型决定系数较低,不符合精度需求,当隐含层层数为 4 层时决定系数最大,但模型在验证集上的决定系数与在训练集上的决定系数相差较大,说明模型出现了过拟合现象;而当隐含层层数为 3 层时,不仅能满足预测精度要求,也不会出现过拟合现象。故 BP 神经网络电磁继电器自适应时间校正模型层数设计为 3 层。

5)隐含层神经元设计。隐含层中的神经元个数过少会导致模型欠拟合,过多会导致模型过拟合。为保证模型的泛化能力,通过经验公式确定模型隐含层神经元数:

$$h_1 = \log_2 m \tag{1}$$

$$h_2 = \sqrt{mn} \tag{2}$$

$$h_3 = \sqrt{m+n} + \alpha_1 \tag{3}$$

$$h_4 = \frac{N}{\alpha_2 \times (m+n)} \tag{4}$$

式中: $h_i$  为隐含层的神经元个数,其中  $i=1,2,3,4$ ;  $m$  为输入层神经元个数;  $n$  为输出层神经元个数;  $N$  为训练集样本数;  $\alpha_1$  为 1~10 之间任意常数,  $\alpha_2$  为 2~10 之间任意常数。隐含层中的神经元个数过少会导致模型欠拟合,过多会导致模型过拟合。为保证模型的泛化能力,对隐含层神经元数在 5~25 之间的 BP 神经网络自适应时间校

正模型进行训练,每组参数调试均经过 20 次实验,取 20 次实验模型验证集及测试集评价指标的平均值验证模型精度,其具有代表性的训练结果如表 3 所示。当隐含层神经元数为 23 时,训练集决定系数为 0.980 9,验证集决定系数 0.978 2,没有出现拟合以及欠拟合现象,故将模型隐含层每层所包含的神经元个数设置为 23 个。

表 3 不同神经元数模型表现结果

Table 3 Results of models with different numbers of neurons

模型网络结构	训练集均方误差	训练集决定系数	验证集均方误差	验证集决定系数
20	0.208 4	0.979 6	0.257 6	0.976 3
21	0.212 4	0.978 8	0.254 9	0.975 8
22	0.201 5	0.980 9	0.246 5	0.976 0
23	0.201 2	0.980 9	0.243 1	0.978 2
24	0.203 4	0.980 5	0.255 1	0.977 8
25	0.203 0	0.980 6	0.255 9	0.977 6

最终运用测试集进行测试,随着迭代次数的增加,测试集的均方误差值不断减小最终趋于稳定,并且决定系数在逐渐增大并趋于稳定(见图 4)。从图 4 可知,在训练样本数据集上,均方误差值最终稳定在 0.210 8,决定系数高达 0.979 2,在测试样本数据集中,均方误差值最终减小到 0.255 3,决定系数也达到了 0.969 9,两者相差较小,说明模型没有出现拟合现象,该模型可用于电磁继电器动作时间预测,并可用预测的时间数据对起爆系统从机时间误差进行时间校正,从而提高起爆系统的起爆时间精度。

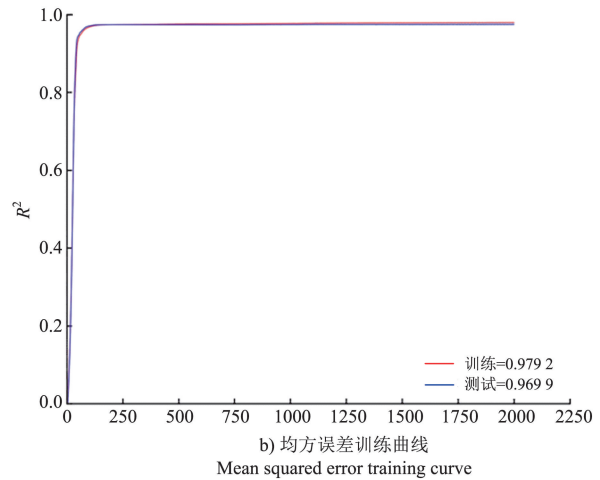
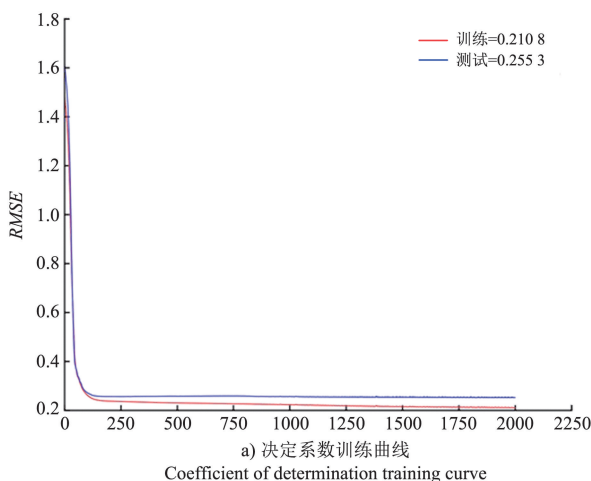


图 4 模型训练结果

Fig. 4 Model training result

### 3.2 起爆系统程序设计

起爆系统开机后,首先采用 BP 神经网络算法对电磁继电器动作时间进行时间校正。输入正确开机密码后,对起爆模式进行选择。在选择单点起爆模式后,需对起爆系统从机机号进行选择,选择合适的机号后,对起爆系统进行延时时间设定、充电、起爆等操作;选择多点起爆模式后,可对每台从机进行起爆时间设置,时间输入可精确到毫秒,具有延时起爆功能。起爆系统程序设计流程如图 5 所示。

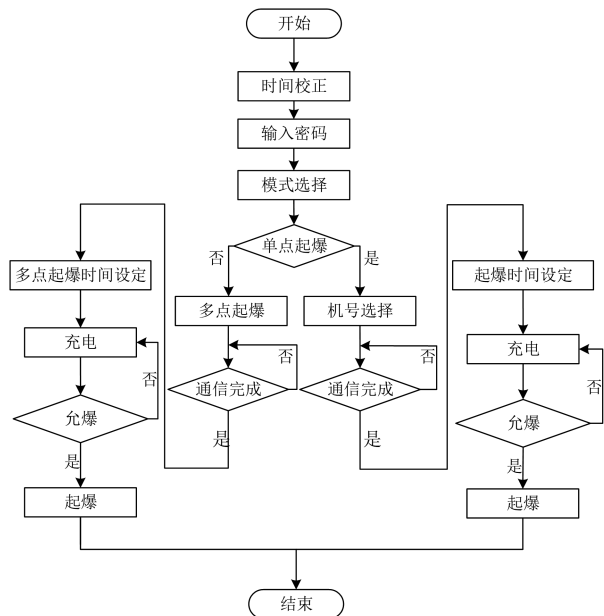


图 5 起爆系统程序设计流程

Fig. 5 Programming flow for initiation system

### 4 起爆系统实验与结果分析

起爆系统起爆实验平台主要包括:单个主机、2个从机、起爆电源、示波器、电流钳、10 Ω 模拟负载、上位机等。首先对起爆系统完成时间矫正,待从机接收起爆信号后,闭合起爆系统放电回路,对模拟负载进行放电,用示波器电流钳检测起爆电源放电信号,并观测示波器显示的起爆电容放电电流波形,验证起爆系统的时间精度,搭建好的实验平台如图 6 所示。

1) 两点同步起爆时间精度测试。起爆系统两点同步起爆放电电流波形和展开后的两点同步起爆放电波形如图 7 所示,从展开后的波形可以看出,通道一的放电电流为 35 A,通道二的放电电流为 37 A,满足二氧化碳致裂器发热装置的放电需

求。通过观察波形可知,通道一与通道二放电电流峰值时间误差为 1.2ms,小于液态二氧化碳气化时间 5~7 ms,满足二氧化碳致裂器同步爆破时间精度需求。

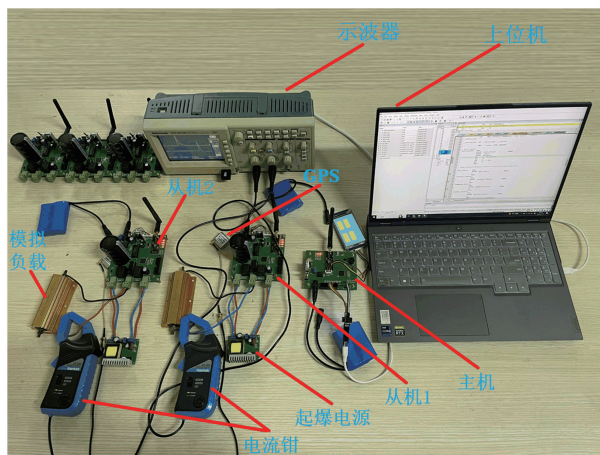
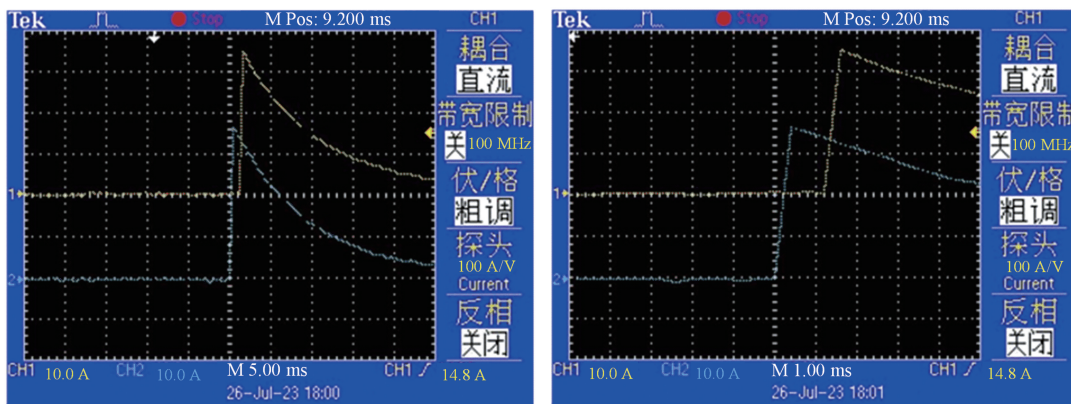


图 6 起爆系统实验平台

Fig. 6 Initiation system experimental platform



a) 两点同时起爆放电电流波形  
Simultaneous discharge current waveform at two points

b) 展开后的波形  
Expanded waveform

图 7 两点同步起爆时间精度波形

Fig. 7 Waveform of time synchronization

accuracy for two-point detonation

2) 两点顺序起爆时间精度测试。将起爆系统从机两点顺序起爆时间调整为 30~200 ms 之间(见图 8),通道一以及通道二的放电电流为 35 A 以上,满足二氧化碳致裂器发热装置放电需求。

顺序起爆误差在 1.5 ms 以内(见表 4),可满足二氧化碳致裂器临管起爆时间间隔需求,可以使相邻炮孔内部起爆后产生的应力波在时间和空间上分离,使主震段错开,可进一步提高爆破安全性。

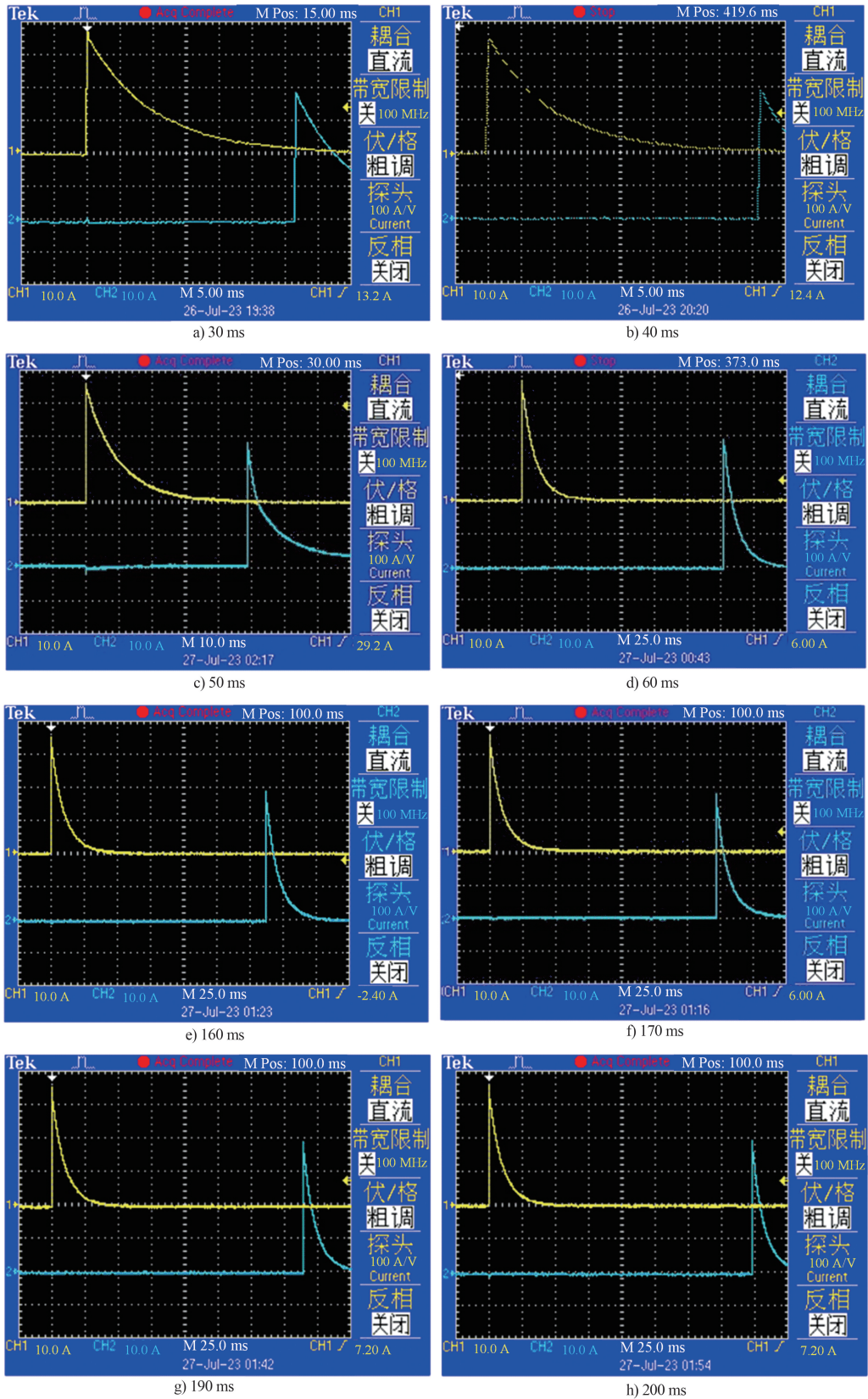


图 8 不同起爆时间下两点顺序起爆时间精度波形

Fig. 8 Waveform of precision of two-point sequential detonation time under different detonation times

表 4 顺序起爆实验结果及误差

Table 4 Sequential detonation experiment results and errors

实验组数	顺序起爆时长/ms	起爆单元 1 起爆时间 /ms	起爆单元 2 起爆系时间 /ms	顺序起爆时间误差 /ms
1	30	31.419	0.425	0.994
2	40	0.625	41.753	1.128
3	50	51.821	0.532	1.289
4	70	0.468	71.621	1.153
5	90	91.721	0.726	0.995
6	110	109.178	0.476	-1.298
7	150	0.579	149.278	-1.301
8	160	161.896	0.687	1.209
9	170	0.483	171.505	1.022
10	190	189.467	0.686	-1.219

## 5 结论

1)通过基于反激拓扑结构的起爆电源,将起爆系统外部电源提供的 12 V 直流电压进行升压变换,并将转换后的能量集中储存在起爆电容中,起爆电容可向二氧化碳致裂器发热装置迅速放电,保证起爆系统拥有充足的发火能量。

2)采用基于 BP 神经网络的自适应时间矫正算法,对电磁继电器动作时间误差进行精准矫正,降低了起爆系统多点起爆时间误差。

3)根据起爆系统的整体功能需求,完成了起爆系统整体硬件以及软件研发,搭建起爆系统多点起爆实验平台,进行多点起爆模拟实验,通过实验数据验证了起爆系统在 2 种起爆模式下的起爆时间精度。

### 参考文献(References):

- [ 1 ] 周盛涛,罗学东,蒋楠,等. 二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 883-893.
- ZHOU S T, LUO X D, JIANG N, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7):883-893.
- [ 2 ] LIU G, LI B, ZHANG Z, et al. Effects of liquid CO<sub>2</sub>

phase transition fracturing on methane adsorption of coal[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(3): 1 949-1 961.

- [ 3 ] 肖婷,欧玉峰. 致裂器对液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩的功效影响分析[J]. 工程爆破, 2022, 28(4):78-83.
- XIAO T, OU Y F. Analysis of the effect of cracker on liquid CO<sub>2</sub> phase change rock breaking[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4):78-83.
- [ 4 ] 李国东,李华,李万涛,等. 二氧化碳相变致裂技术在司家营铁矿的研究与应用[J]. 现代矿业, 2021, 37(5): 90-93.
- LI G D, LI H, LI W T, et al. Application and research of carbon dioxide phase change cracking technology in sijiaying iron mine[J]. Modern Mining, 2021, 37(5): 90-93.
- [ 5 ] ZHOU S T, LUO X D, JIANG N, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 883-893.
- [ 6 ] XIA J Q, DOU B, TIAN H, et al. Research on initiation of carbon dioxide fracturing pipe using the liquid carbon dioxide phase-transition blasting technology [J]. Energies, 2021, 14(3): 521-537.
- [ 7 ] 刘庆,周桂松,杜华善,等. 遥控导爆管起爆系统的设计与应用[J]. 爆破器材, 2019, 48(3): 44-48.
- LIU Q, ZHOU G S, DU H S, et al. Design and application of a remote detonation tube initiation system [J]. Explosive Materials, 2019, 48(3): 44-48.
- [ 8 ] 迟洪鹏,范纯超,田惺哲,等. 基于无线网络的地下远程遥控起爆系统研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(2): 120-124.
- CHI H P, FAN C C, TIAN X Z, et al. Research on underground remote control detonation system based on wireless network[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2): 120-124.
- [ 9 ] 尹国福,张进成,任西,等. 可寻址起爆网络系统设计及可行性[J]. 含能材料, 2019, 27(5): 426-433.
- YIN G F, ZHANG J C, REN X, et al. Design and

- feasibility of an addressable initiation network system [J]. *Energetic Materials*, 2019, 27(5): 426-433.
- [10] 李泽华, 李顺波, 杨军, 等. 露天爆破智能设计系统开发及应用[J]. *现代矿业*, 2020, 36(11): 179-181.  
LI Z H, LI S B, YANG J, et al. Development and application of intelligent design system for open-pit blasting [J]. *Modern Mining*, 2020, 36 ( 11 ): 179-181.
- [11] 梁车平, 张玉若, 金丽, 等. 基于冲击片雷管的多点同步起爆系统研究[J]. *爆破器材*, 2018, 47(3): 31-36.  
LIANG C P, ZHANG Y R, JIN L, et al. Research on a multi-point simultaneous initiation system based on EFI [J]. *Explosive Materials*. 2018, 47 ( 3 ): 31-36.
- [12] 王波, 董云龙, 陈召锋, 等. 民用爆炸物品数字式起爆系统末端管控设备的研究[J]. *采矿技术*, 2020, 20(6): 192-193, 198.  
WANG B, DONG Y L, CHEN Z F, et al. Research on terminal control equipment of digital detonation system for civil explosives[J]. *Mining Technology*, 2020, 20(6): 192-193, 198.
- [13] 韩克华, 焦清介, 褚恩义, 等. 基于爆炸同步网格技术和冲击片雷管技术的两种多点同步起爆系统设计方法及性能[J]. *兵工学报*, 2020, 41(S2): 102-110.  
HAN K H, JIAO Q J, CHU E Y, et al. Two design methods and performance of multi-point synchronous initiation systems based on synchronous explosive circuit and exploding foil initiator technologies[J]. *Acta Armamenta*, 2020, 41(S2): 102-110.
- [14] JATIN C, RAVINDRA P. Design and development of Wi-Fi based wireless detonator[J]. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 2021, 4(12): 117-119.
- [15] 高飞, 刘吉, 武锦辉, 等. 基于 LoRa 的远程多路起爆系统的设计[J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(6): 79-85.  
GAO F, LIU J, WU J H, et al. Design of multiple initiation system based on LoRa [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(6): 79-85.
- [16] 徐鹏, 杨海燕, 程宁, 等. 基于优化 BP 神经网络的船舶动力系统故障诊断[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(Z1): 1-8.  
XU P, YANG H Y, CHENG N, et al. Fault diagnosis of ship power system based on optimized BP neural network [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(Z1): 1-8.
- [17] 孙宝磊, 孙嵩, 张朝能, 等. 基于 BP 神经网络的大气污染物浓度预测[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(5): 1 864-1 871.  
SUN B L, SUN H, ZHANG C N, et al. Forecast of air pollutant concentrations by BP neural network[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(5): 1 864-1 871.
- [18] 胡业红, 何梦, 周参军, 等. 基于 GA-BP 神经网络的毫秒延时爆破振动速度预测研究[J]. *中国矿业*, 2022, 31(2): 72-77.  
HU Y H, HE M, ZHOU C J, et al. Study on vibration velocity prediction of millisecond delay blasting based on GA-BP neural network[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(2): 72-77.
- [19] 翟国富, 崔行磊, 杨文英. 电磁继电器产品及研究技术发展综述[J]. *电器与能效管理技术*, 2016(2): 1-8.  
ZHAI G F, CUI X L, YANG W Y. Overview for development of research and technologies of electromagnetic relays[J]. *Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology*, 2016(2): 1-8.