DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202508011

基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法

田昕宇,蒋海燕,毛伯永
(西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

摘　要:针对接触式测量靶网在破片速度-空间分布同步测量和少通道数需求,提出了一种基于串-并联组合式电路结构的电阻网靶破片群多参数少通道数测量方法,通过设计双面 $X—Y$ 型测试靶结构,采用等比数列方式优化电阻值配置,构建了靶网电压响应与破片群着靶坐标的定量映射模型,实现了破片群不同着靶位置和速度参数的有效提取,并以正反面 8×8 位置网靶为例,通过电路仿真和弹道枪试验对破片作用位置识别功能和速度测量功能进行验证。结果表明,设计的新型双通道电阻网靶仅需两路通道即可实现单破片、多破片着靶位置的可靠测量,位置区域识别结果与实际基本一致,且破片作用于测试电路总线、多个破片击穿靶网正面或反面同一测试区域等特殊工况也能较好识别;同时对比基于高速摄影获取的破片速度结果,速度测量偏差小于 7.61%。可见提出的破片群多参数少通道数测量方法可实现破片群速度-空间分布的同步测量,为破片飞行参数获取提供新的思路。

关键词:电阻网靶;少通道数;破片速度;破片空间分布;高效毁伤
中图分类号:TJ410.6　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-7812(2026)01-0078-12

A Multi-parameter and Few-channel Measurement Method for Fragment Clusters Based on Resistance Mesh Targets

TIAN Xin-yu, JIANG Hai-yan, MAO Bo-yong
(Xi′an Modern Chemistry Research Institute, Xi′an 710065, China)

Abstract: In addressing the need for the synchronous measurement of fragment velocity and spatial distribution with a minimal channel count in contact measurement target grids, a multi-parameter, few-channel-count measurement method for fragment clustersusing a resistive network target based on a series-parallel hybrid circuit structure was proposed. A quantitative mapping model was established between the target grid voltage response and the impact coordinates of fragment clusters by designing a double-sided $X—Y$ test target configuration and optimizing resistance values in a geometric progression, enabling effective extraction of various impact positions and velocity parameters of fragment clusters. The fragment impact location identification capability and velocity measurement function were validated through circuit simulations and ballistic gun tests by using a 8×8 position grid target on both sides as an example. The results demonstrate that the newly designed two-channel resistive network target can reliably measure the impact positions of both single and multiple fragments with only two channels, and that the location identification results are largely consistent with actual conditions. Special scenarios were also accurately identified, such as fragments acting on the test circuit bus, and multiple fragments penetrating the same test area on either the front or back of the target grid. Furthermore, when compared with fragment velocity data obtained via high-speed photography, the velocity measurement deviation was found to be less than 7.61%. These results suggest that the proposed multi-parameter, few-channel-count measurement method for fragment clusters allows the synchronous measurement of velocity and spatial distribution, providing a novel approach of acquiring fragment flight parameters.

Keywords: resistance mesh target; few-channel; fragment velocity; spatial distribution of fragments; highly effective destruction

收稿日期:2025-08-27;　　**修回日期**:2025-11-29
作者简介:田昕宇(2000－),男,硕士研究生。E-mail:tianxinyu0819@163.com
通信作者:蒋海燕(1985－),女,博士,研究员。E-mail:jianghaiyan19851@163.com
引用本文:田昕宇,蒋海燕,毛伯永.基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法[J].火炸药学报,2026,49(1):78-89.
TIAN Xin-yu, JIANG Hai-yan, MAO Bo-yong. A Multi-parameter and Few-channel Measurement Method for Fragment Clusters Based on Resistance Mesh Targets[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants(Huozhayao Xuebao),2026,49(1):78-89.

引　言

破片作为战斗部重要毁伤元之一，精确测量破片群速度、空间分布对于战斗部和目标均具有重要意义。从战斗部层面来讲，同步测量得到的破片群速度、空间分布精确数据是评估战斗部毁伤效能、重构战斗部威力场、优化武器弹药结构设计的直接依据[1-2]；从目标层面来讲，鉴于不同目标的关键部件分布与防护等级各异，将测量得到的破片群速度、空间分布精确数据与目标几何模型和易损性模型深度融合，才能可靠评价破片对特定目标的毁伤效果，进而实现对目标毁伤特性的准确且精细化评估。

目前测量战斗部破片速度、空间分布主要采用梳状靶、电阻网靶和经纬靶。梳状靶因其成本低、布设效率高等优势[3]在该领域得到了广泛的使用，该方法通常用于获取破片速度，对于破片群空间分布的获取仍然依赖于人工检靶，耗时费力，并且无法将破片群中各个破片的速度信息和空间分布信息进行有效对应[4]；电阻网靶利用破片击穿靶网产生的电压变化量判断破片过靶信息[5]，其优势在于测量所需的通道数量较少，但是目前常用的电阻网靶测量方案无法实现破片速度和着靶位置的同步少通道数测量[6]，电阻网靶示意图如图 1(a)所示；经纬靶[7-9]成功解决了破片群速度、空间分布同步测量的问题，但是却存在数据通道需求较大的问题，使其在大面积测量场景下仍然存在显著局限性，经纬靶示意图如图 1(b)所示。

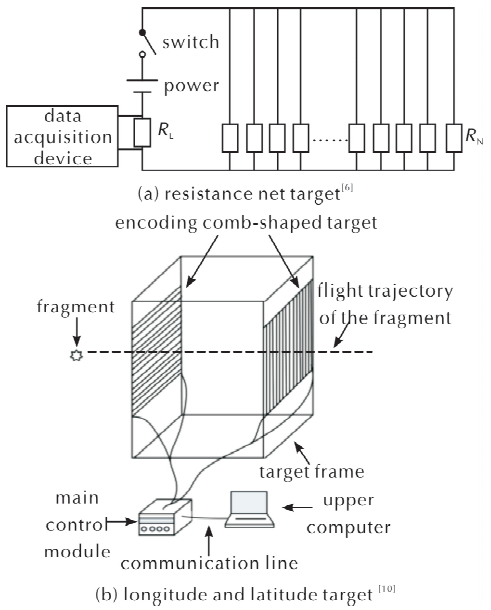


图 1　电阻网靶和经纬靶示意图

Fig. 1　Schematic diagrams of resistance network targets and longitude and latitude targets

针对上述问题，本研究提出了一种基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法，通过优化靶网测试电路拓扑结构及电阻值，构建了靶网电压响应与破片群着靶坐标的定量映射模型，在保证破片群速度参量、空间分布同步测量的前提下，大幅降低测试所需要的数据采集仪通道数。

1　基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法原理

1.1　破片群着靶位置识别

基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法采用破片着靶 X 轴信息和 Y 轴信息分开测量的破片着靶位置识别思路，通过优化电阻网靶测试电路拓扑结构以及定制化配置网络电阻值，构建了靶网电压响应与破片群着靶坐标的定量映射模型，使其依靠较少的数据采集通道，就可以利用破片群着靶前后测试电路整体的电压变化量 ΔU 推算出破片群中各个破片的着靶位置。下面将对该方法的破片着靶位置识别原理和相应的数据处理方法进行详细介绍。

1.1.1　破片着靶位置识别原理

对于靶网测试电路拓扑结构的优化，舍弃了图 1(b)中传统恒压源供电模式的并联式结构，转而采用恒流源供电模式的串-并联式结构：整体的串联设计极大程度地降低了数据采集通道数量的需求；局部的并联结构，将测试区域等分成了 n 个横向排列的区域和 m 个纵向排列的区域，X/Y 轴位置信息测量电路配合使用，将靶网有效测量区域分成 $n \times m$ 个破片着靶位置识别区域。优化后的测试电路示意图如图 2 所示。

对图 2 中测试电路进行分析可以得出，破片击穿靶网产生的电压变化量 ΔU 与测试电路输出阻抗变化量 ΔR 的映射关系如式(1)所示：

$$\Delta U = \frac{I \times \Delta R}{2} \tag{1}$$

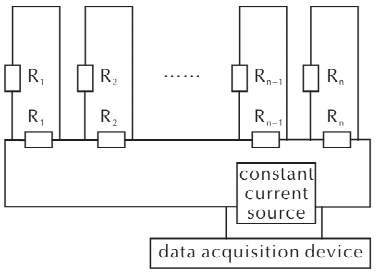
式中：ΔU 为测试电路整体电压变化量；I 为恒流源输出电流值；ΔR 为测试电路输出阻抗变化量，特别的当一个破片作用在测试电路两个相邻区域交界，造成这两个相邻区域同时失效时，ΔR 为该相邻区域对应电阻值之和。对于多个破片同时击穿靶板的情况，产生的电压变化量为单个破片电压变化量的加和。

对于测试电路电阻值的选取，鉴于该新型双通道电阻网靶主要应用于多破片测量场景，势必会出现多个破片同时着靶的情况，因此需要对测

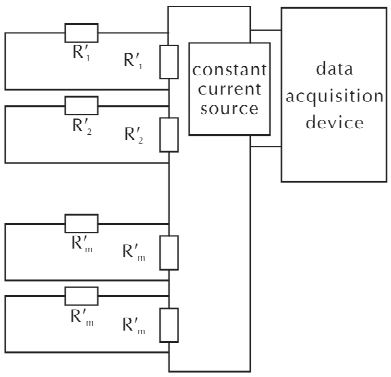
试电路电阻值进行特殊化选取，以确保不同着靶工况下产生的阻抗变化量 ΔR 具有可区分性。以图 2(a)中 X 轴位置信息测量电路为例（Y 轴位置信息测量电路同理），破片群同时击穿靶网 n 个区域中任意 i 个不同区域可能出现的工况总数 N_i，可通过数理统计中的组合计算公式进行计算，具体计算公式如下：

$$N_i = C_n^i = \frac{A_n^i}{A_i^i} \tag{2}$$

式中：i 为同时被击穿的靶网区域数量，$i \in \{1, 2, \cdots, n\}$；$N_i$ 为相应的组合数，即 i 个区域被同时击穿的所有可能的工况数；n 为 X 轴测试电路横向排列的区域总数。



(a) X-axis position information measurement circuit



(b) Y-axis position information measurement circuit

图 2 基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法测试电路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test circuit for the multi-parameter and few-channel measurement method of fragment clusters based on resistance net targets

根据式(2)可以进一步计算出多破片同时击穿 X 轴测试电路不同测试区域所有可能的工况数 N：

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + \cdots + N_{n-1} + N_n \tag{3}$$

其中：N 为多破片同时击穿 X 轴测试电路不同测试区域所有可能的工况数；n 为 X 轴测试电路横向排列的区域数量。

为避免多破片同时着靶引发的信号混叠导致位置信息分辨能力丧失，测试电路采用了基于等比数列的电阻值配置方案。以 X 轴测试电路为例（Y 轴测试电路同理），以最左侧区域为基准，将 n 个测试区域从左往右依次排序，设定基准电阻为 R_o，比例系数为 k，则第 l 个区域电阻值 R_l 计算公式如下：

$$R_l = R_o \times k^{l-1} \tag{4}$$

式中：R_l 为 X 轴测试电路第 l 个区域电阻值，$l \in \{1, 2, \cdots, n\}$；$R_o$ 为基准电阻；k 为比例系数。

以等比数列的形式配置电阻值时，当不同区域被击穿，由于电阻值的指数级差异，单个区域断路所产生的输出阻抗变化量亦呈指数关系，这种设计既保证了选择的电阻值为市面上常见的电阻值，又使得破片群击穿 X 轴位置信息测量电路任意 i 个区域（共 n 个区域）的 N 种工况所产生的输出阻抗变化量 ΔR 具有可区分性。该特性保证了该测量方法在面对多破片同时击穿的工况时，仍能实现对各破片着靶位置的有效判别。

考虑到实际破片群的飞行状态及相关几何形状参数，在实际测量中可能会出现以下 3 种工况：多破片先后着靶工况、多破片同时着靶工况以及大尺寸破片着靶工况，这 3 种情况具体的着靶位置判别方式如图 3 所示。图中 L 作为过程量，仅在流程中其标识作用，并不具备实际物理意义。

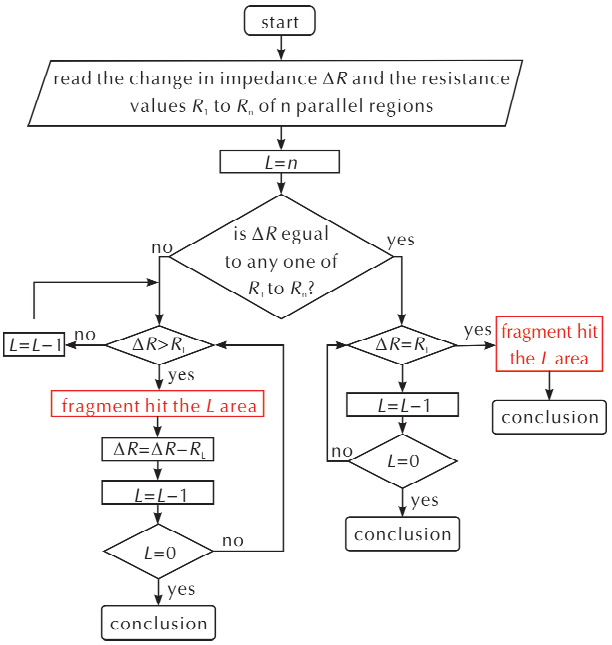


图 3 着靶位置判别流程图

Fig. 3 Target position discrimination flowchart

结合式(1)和图 3 可以发现，等比数列的电阻值配置方案将破片群实际着靶位置映射为测试电路输出阻抗变化量 ΔR，恒流源供电模式的串-并联式测试电路结构进一步将阻抗变化量 ΔR 映射为过靶

信号电压变化量 ΔU，最终建立了靶网电压响应与破片群着靶位置的定量映射关系，使得基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法通过读取破片过靶信号的电压变化量 ΔU 就可以反推得到破片的着靶位置。

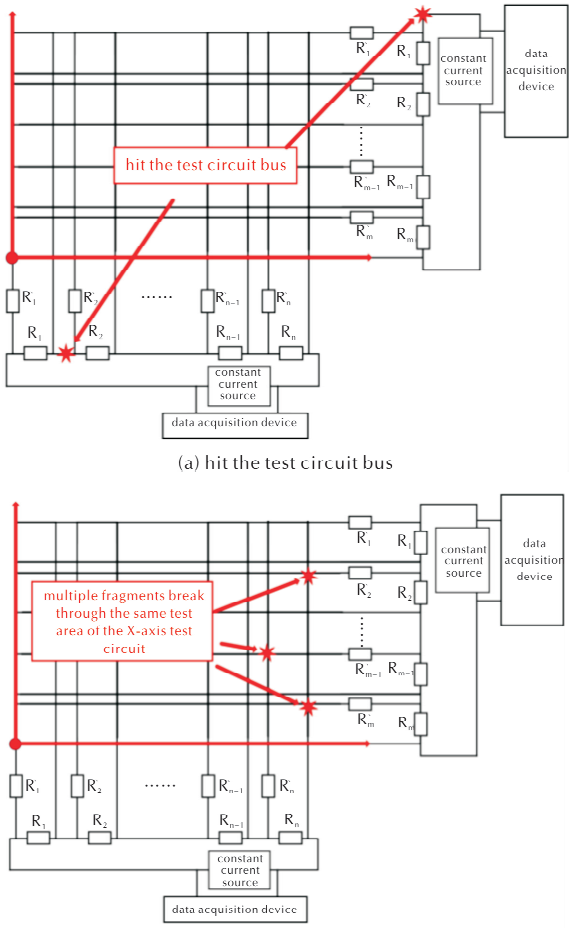
1.1.2　数据处理方法

分析破片着靶过程可知，当破片群击穿靶板时，靶板穿孔导致局部测试电路发生断路，测试电路输出阻抗变大，由式(1)可知，整体测试电路输出电压同样也会变大，这一过程在破片群过靶信号上的宏观表现为过靶信号将呈现多个阶跃式电压升高。基于上述分析并结合 1.1.1 小节测量方法原理相关内容可以得知，基于电阻网靶的破片群多参数通道数测量方法的着靶位置信息提取方法如下：分别提取 X/Y 轴信息测试电路各自上升沿前后两端的电压变化量 ΔU，根据式(1)计算出相应的输出阻抗变化量 ΔR，根据图 3 就可以判断出破片群的着靶位置。多破片先后着靶工况、多破片同时着靶工况以及大尺寸破片着靶工况均可按照上述数据处理方法对破片群着靶信息进行提取。

由于破片飞散方向具有随机性，在多个破片先后着靶工况当中可能会出现击中测试电路总线、多个破片击穿 X 轴或 Y 轴测试电路同一测试区域等特殊工况，因此需要对这两种特殊工况的数据处理方法进行特别说明。

对于击中测试电路总线这一情况，破片击中总线导致测试电路整体断路，测试电路输出阻抗变化量 ΔR 趋近于无限大，根据式(1)可以得出测试电路电压变化量 ΔU 同样也会趋近于无穷大，因此在实际试验中，如果观察到某一测试电路电压变为满量程值，就可以判定为破片击中该测试电路总线。击中测试电路总线着靶示意图如图 4(a)所示。

对于多个破片击穿 X 轴或 Y 轴测试电路同一测试区域这一情况，假设多个破片击穿 X 轴测试电路同一区域，击穿 Y 轴测试电路不同区域，此时虽然采集到的 X 轴测试电路过靶信号只有一个上升沿，但是 Y 轴测试电路过靶信号依然会有多个上升沿，通过 Y 轴测试电路过靶信号上升沿数量就可以判断具体有几个破片击穿靶网，因此在实际试验中，如果观察到其中一条通道过靶波形只有一个上升沿而另一个通道有多个上升沿，且电压均未达到满量程值，就可以判定为多个破片击穿 X 轴或 Y 轴测试电路同一测试区域，再根据式(1)通过电压变化量 ΔU，得到测试电路输出阻抗变化量 ΔR，最终可以判断出各个破片的着靶位置。多个破片击穿 X 轴测试电路同一测试区域示意图如图 4(b)所示。



(a) hit the test circuit bus

(b) multiple fragments broke through the *X*-axis test circuit

图 4　特殊工况着靶示意图

Fig. 4　Special working condition target diagram

在实际使用过程当中，由于该方法采用破片 X 轴着靶信息和破片 Y 轴着靶信息分开测量的破片着靶位置识别思路，因此需要事先规定坐标原点，方便用二维坐标的方式表征破片具体着靶位置，具体形式如下：

$$(x_a, y_b)$$

其中：x_a 表示破片击中 X 轴测试电路相对坐标原点的第 a 个区域，其中 $a \in \{1,2,\cdots,n\}$；y_b 表示破片击中 Y 轴测试电路相对坐标原点的第 b 个区域，其中 $b \in \{1,2,\cdots,n\}$。特别的，当一个破片作用在 a 区域和 a-1 区域交界，造成这两个相邻区域同时失效时，x_a 表述为 a/a-1 交界，y_b 同理。

由于该方法的测试电路由两个相互独立的测试电路构成，因此两个测试电路相互重合的区域，才是实际有效测量区域，最终设定重合区域左下角为坐标原点，破片着靶区域示意图如图 5 所示。

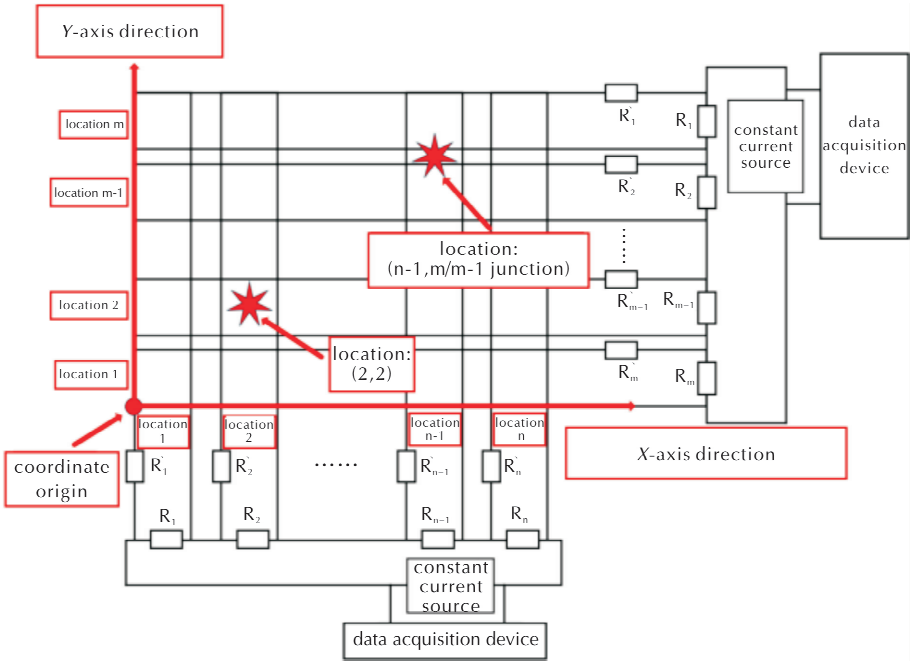


图 5 破片着靶区域示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fragmented target area

1.2 破片群速度测量

基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法采用区截测速方法，能够直接、高效地解算出破片群中各破片的飞行速度。

当破片到达触发位置时，以此时作为计时零点，网靶测试电路触发，当 z 个破片击穿靶板后，通过数据采集仪采集到的过靶波形会有 z 个上升沿，记录各个上升沿的起始时刻 T_z，事先测量好触发线到靶板中心的距离 S，通过公式(5)就可以计算出破片群中各个破片的速度 V_z，区截测速原理示意图如图 6 所示。对于多个破片击穿 X 轴或 Y 轴测试电路同一测试区域、击中测试电路总线这种特殊工况，由于上述两种特殊工况依然可以造成测试电路整体电压变化，不影响过靶信号上升沿起始时刻的读取，因此该网靶仍然可以对破片的速度进行获取。

$$V_z = \frac{S}{T_z} \tag{5}$$

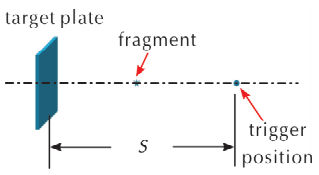
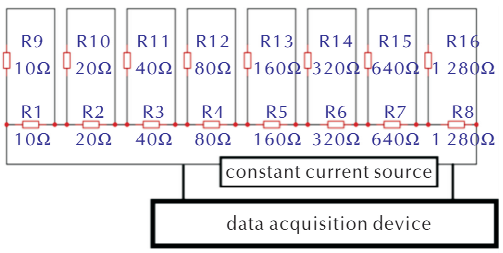


图 6 区截测速原理示意图

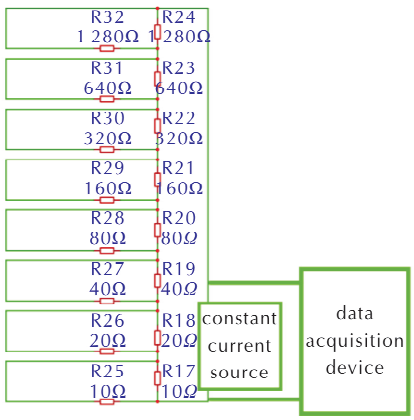
Fig. 6 Schematic diagram of the principle of zone interception speed measurement

2 新型双通道电阻网靶电路仿真

依照基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法设计的新型双通道电阻网靶测试电路如图 7 所示。X/Y 轴位置信息测量电路均由 8 个位置识别区域构成，两个测试电路组合使用将靶网有效测量区域分为 64 块破片着靶区域；测试电路电阻采用基准电阻 R_0 为 10 Ω、比例系数 k 为 2 的等比数列的电阻值配置方案。



(a) X-axis position infommation measurement circuit



(b) Y-axis position information measurement circuit

图 7 新型双通道电阻网靶测试电路图

Fig. 7 Test circuit diagram of the new dual-channel resistance net target

由于该新型双通道电阻网靶 X/Y 轴位置信息测量电路结构、电阻值均相同，仅空间排布不同，因此可以采用相同的仿真电路对其进行仿真验证，仿真电路示意图如图 8 所示。恒流源电流值选定为 4 mA；采用延时开关（S1～S8）模拟破片击穿导线的情况，开关断开表示该回路被破片击穿，开关导通表示未击穿；万用表用来读取破片击穿之后整个电路的电压，示波器用来记录破片过靶波形。

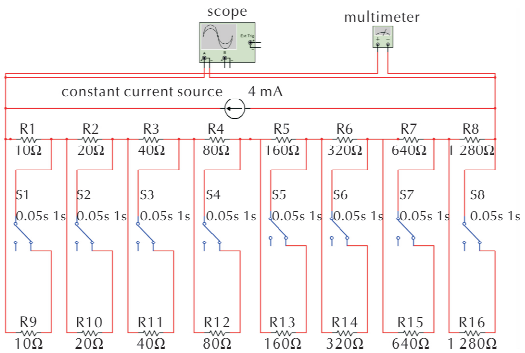


图 8　仿真电路示意图

Fig. 8　Schematic diagram of the simulation circuit

仿真得到的各个并联区域断路产生阻抗变化量 $\Delta R_1'$ 和电压变化量 $\Delta U_1'$ 理论值如表 1 所示。

表 1　各并联区域阻抗变化量和电压变化量理论值

Table 1　Theoretical values of impedance variation and voltage variation in each parallel region

resistance number	resistance value/Ω	$\Delta R_1'$/Ω	$\Delta U_1'$/V
R_1、R_9	10	10	0.02
R_2、R_{10}	20	20	0.04
R_3、R_{11}	40	40	0.08
R_4、R_{12}	80	80	0.16
R_5、R_{13}	160	160	0.32
R_6、R_{14}	320	320	0.64
R_7、R_{15}	640	640	1.28
R_8、R_{16}	1 280	1 280	2.56

注：$\Delta R_1'$ 表示单个并联区域被破片击穿产生的阻抗变化量理论值；$\Delta U_1'$ 表示单个并联区域被破片击穿产生的阻抗变化量理论值。

对 1.1.1 小节中提出 3 种破片群着靶工况进行仿真，具体的仿真工况如表 2 所示，仿真得出的破片群过靶波形如图 9 所示。

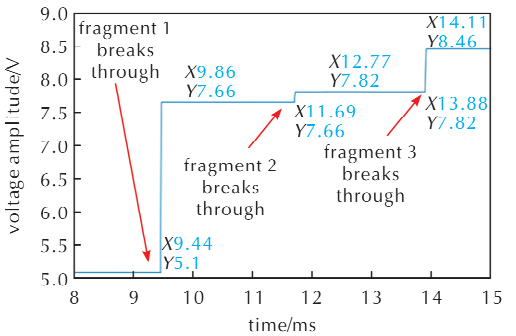
对于多破片先后着靶工况（图 9(a)），过靶信号三个上升沿电压变化量为 2.56、0.16、0.64 V，起始时刻分别为 9.44、11.69 和 13.88 ms。采用 1.1.2 小节中的数据处理方法，并对比表 1 中理论值可知，破片 1～破片 3 分别在 9.44、11.69 和 13.88 ms 时刻依次击中 1 280 Ω 区域、80 Ω 区域、320 Ω 区域，与表 2 中该工况预设着靶信息相吻合。

表 2　仿真工况

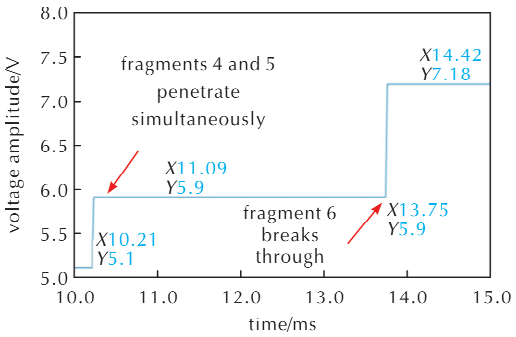
Table 2　Simulation working condition

working condition	fragment number	target position	T/ms	U'/V
multiple fragments hit the target one after another	1	1 280 area	9.44	2.56
	2	80 area	11.69	0.16
	3	320 area	13.88	0.64
multiple fragments hit the target simultaneously	4	80 area	10.21	0.16
	5	320 area	10.21	0.64
	6	640 area	13.75	1.28
large-sized fragments hit the target	7	160 area	7.37	0.32
	8	320 area and 640 area	9.42	1.92

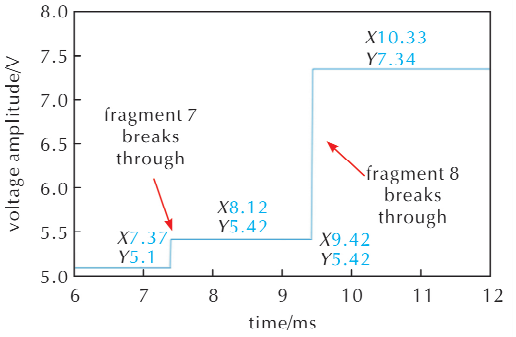
注：T 表示延迟开关预设的断开时间；U' 表示该工况下破片击穿网靶产生的理论电压变化量。



(a) multiple fragments hit the target one after another



(b) multiple fragments hit the target simultaneously



(c) large sized fragments hit the target

图 9　仿真结果示意图

Fig. 9　Schematic diagram of simulation results

对于图 9(b)多破片同时着靶工况，过靶信号两个上升沿电压变化量为 0.8 V 和 1.28 V，起始时刻

分别为 10.21 ms 和 13.75 ms。采用 1.1.2 小节中的数据处理方法，并对比表 1 中理论值可知，破片 4 和破片 5 在 10.21 ms 时刻同时击中 80 Ω 区域和 320 Ω 区域，破片 6 于 13.75 ms 时刻击中 640 Ω 区域，与表 2 中该工况预设着靶信息相吻合。

对于图 9(c)大尺寸破片着靶工况，过靶信号两个上升沿电压变化量为 0.32 V 和 1.92 V，起始时刻分别为 7.37 ms 和 9.42 ms。采用 1.1.2 小节中的数据处理方法，并对比表 1 中理论值可知，小尺寸破片 7 于 7.37 ms 时刻击中了 160 Ω 区域，大尺寸破片 8 于 9.42 ms 时刻击中 320 Ω 区域和 640 Ω 区域，同样与表 2 中该工况预设着靶信息相吻合。

仿真结果表明，对于上述 3 种破片群着靶工况，该测试电路均可实现破片群速度、一维着靶位置信息的可靠测量，且仅需一路数据采集通道。当图 7 中 X/Y 轴位置信息测量电路协同工作时，该新型双通道电阻网靶仅需两路数据采集通道就可以实现破片速度、空间分布的同步测量。

3 新型双通道电阻网靶 PCB 板设计

在设计该新型双通道电阻网靶 PCB 板时，创新性地采用了 PCB 板双面测量架构，即在单块 PCB 基板的正两反面分别布设正交分布且相互独立的测试电路，用以实现破片群着靶点 X、Y 轴位置信息的同步获取，该设计保证了破片可以同时击穿两层测试靶板，防止了破片从两层靶板中间区域两侧飞出而导致后靶未击穿的情况发生，提升了测量的有效性。新型双通道电阻网靶测试电路布局示意图如图 10 所示。

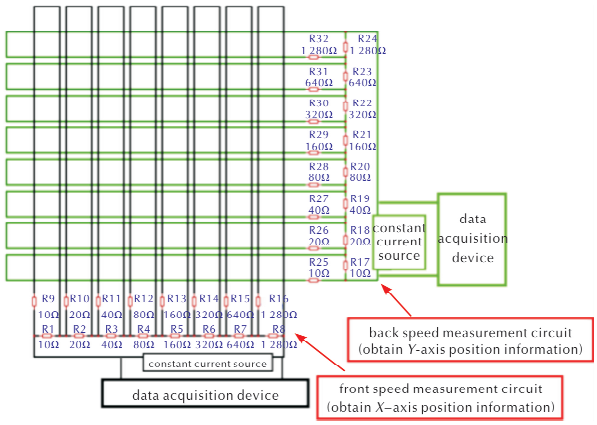
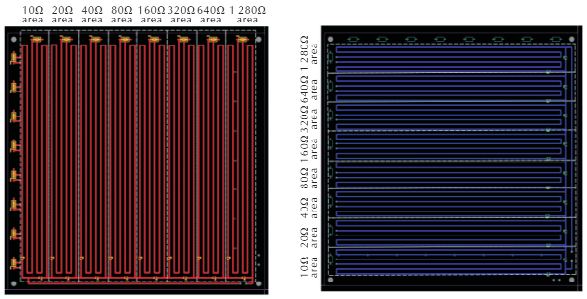


图 10 新型双通道电阻网靶测试电路布局示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the new dual-channel resistance net target test circuit

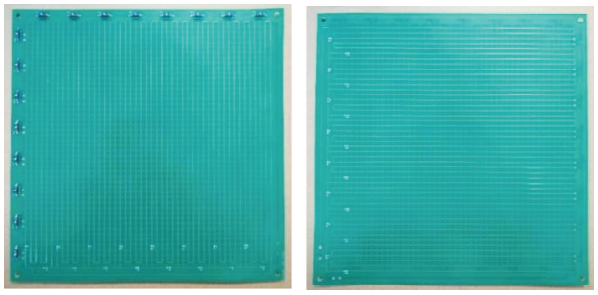
设计该新型双通道电阻网靶时，要求该靶网可以应用于破片直径大于 3 mm 的测量场景，因此布线间距设定为 3 mm，线宽 1 mm，布线采用蛇型布线，使单个测量区域覆盖的面积更大，进而提升靶网的有效测量面积；测试电路中的电阻选择贴片电阻，封装为 0603，额定功率为 1/4 W；靶面铺阻焊绿油(丙烯酸低聚物)，防止电路因为氧化而失效，介电强度为 16 kV/mm，可抗强电磁干扰。设计好的 PCB 板整体尺寸为 210 mm × 210 mm，厚度为 0.4 mm，四周开孔直径为 4 mm，设计好的新型双通道电阻网靶 PCB 板示意图如图 11 所示。制作完成的新型双通道电阻网靶实物图如图 12 所示。



(a) front (b) back

图 11 新型双通道电阻网靶 PCB 板布线示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the PCB board wiring for the new type of resistance net target



(a) front (b) back

图 12 新型双通道电阻网靶实物图

Fig. 12 Physical picture of the new type of resistance net target

4 试验验证

试验采用弹道枪对新型双通道电阻网靶的功能进行验证。靶网采取 1.1 小节中的坐标原点设定方式，将靶板正面面向炮口进行布设，且靠近坐标原点的为测试电路 10 Ω 区域，此时网靶正面测试电路获取破片 X 轴位置信息，反面测试电路获取破片 Y 轴位置信息，破片着靶区域示意图如图 13 所示；利用 PCB 482C05 信号适调仪充当恒流源对靶网进行供电，输出电流为 4 mA；测试电路触发设置为枪口同步触发，利用数据采集仪采集靶网输出信号，数据采集仪设置为电压模式，采样频率为 1 MHz，采样量程为 ± 10 V；高速摄影仪同样采取

枪口触发，测量破片从枪口到靶板的平均速度，与网靶测得的速度值物理意义以及工程意义均一致，并为其提供参考；事先测得靶网中心到枪口的距离为 7.2 m。试验布设示意图和试验现场图如图 14 所示。

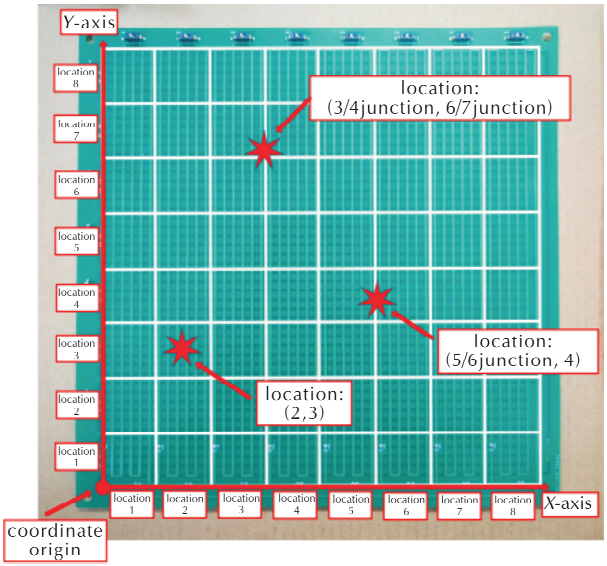
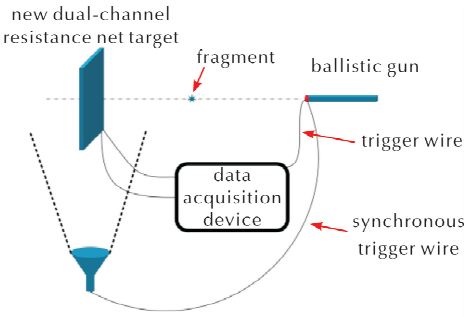
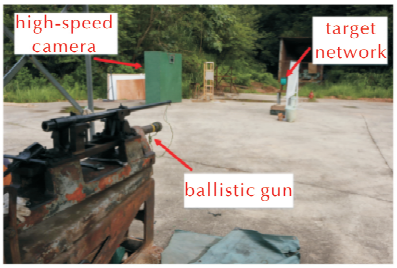


图 13　新型双通道电阻网靶破片着靶区域示意图

Fig. 13　Schematic diagram of the target landing area of the new dual-channel resistance network target fragment



(a) schematic diagram of the test layout



(b) test site diagram

图 14　试验验证示意图

Fig. 14　Schematic diagram of test verification

由于理论仿真与实际存在偏差，因此需要在试验开始之前对靶网各个并联区域断路产生的实际阻抗变化量 $\Delta R_2'$ 和实际电压变化量 $\Delta U_2'$ 进行标定，标定结果如表 3 所示。

表 3　试验现场标定结果

Table 3　Calibration results at the test site

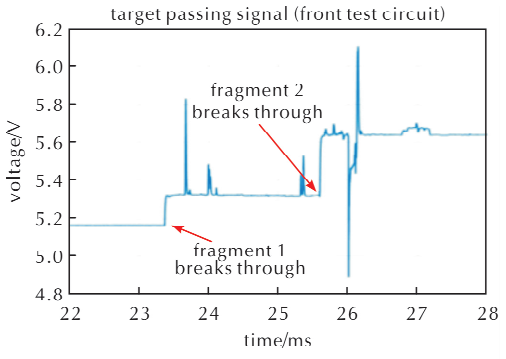
location	$\Delta R_2'/\Omega$	$\Delta U_2'/\mathrm{V}$
10 Ω area	10	0.02
20 Ω area	20	0.04
40 Ω area	40	0.08
80 Ω area	75	0.15
160 Ω area	160	0.32
320 Ω area	325	0.65
640 Ω area	610	1.22
1 280 Ω area	1 205	2.41

注：$\Delta R_2'$ 表示单个并联区域被破片击穿产生的阻抗变化量试验现场标定值；$\Delta U_2'$ 表示单个并联区域被破片击穿产生的阻抗变化量试验现场标定值。

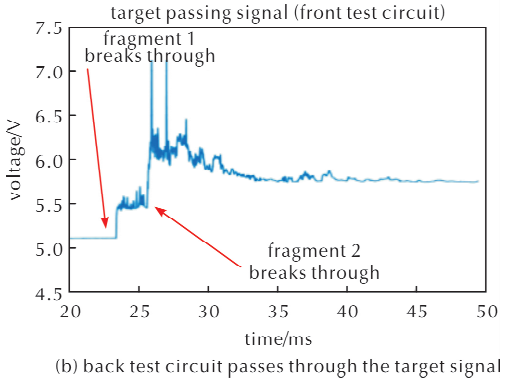
4.1　着靶位置识别功能验证

根据 1.1 小节中提到的破片着靶位置识别方法，对新型双通道电阻网靶位置识别的基本功能进行验证。在实际测量当中由于杂散电容、杂散电感、元器件焊接不牢靠等因素的影响，实际破片击穿产生的电压变化量可能会与表 3 中的标定结果有所偏差。位置识别功能验证试验结果如图 15 所示。

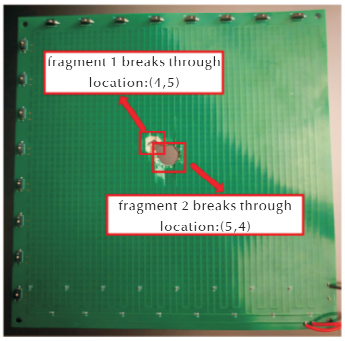
通过图 15(a)和图 15(b)对破片过靶信息进行提取和分析，根据公式(1)得到测试电路输出阻抗变化量 ΔR，通过图 3 所示流程可以进一步得到破片打击在靶网的具体位置，分析结果如表 4 所示。将分析结果和图 15(c)中破片实际着靶位置进行对比，可以发现通过过靶波形分析得出的破片着靶位置与实际着靶位置一致。



(a) front test circuit passes through the target signal



(b) back test circuit passes through the target signal



(c) physical picture of the target net after the fragments penetration

图 15 位置识别功能验证试验结果

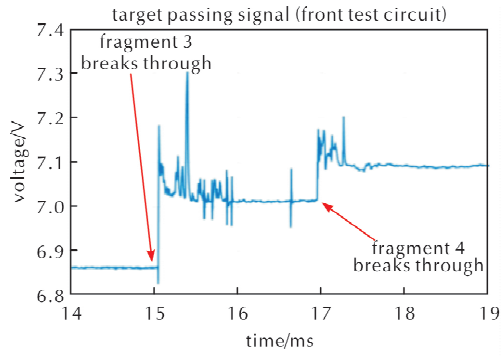
Fig. 15 Verification test results of location recognition function

表 4 破片着靶位置信息分析表

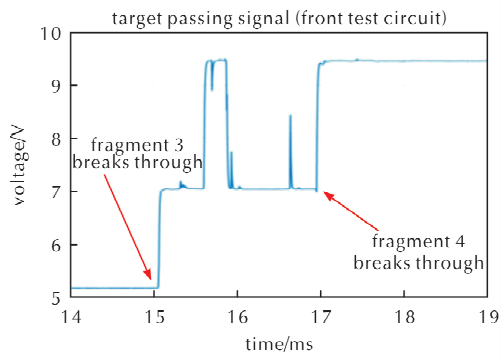
Table 4 Analysis table of fragment target location information

fragment number		ΔU/V	$\Delta R/\Omega$	identify location	actual location
1	*X*-axis	0.16	80	4	4
	Y-axis	0.33	165	5	5
2	*X*-axis	0.32	160	5	5
	Y-axis	0.15	75	4	4

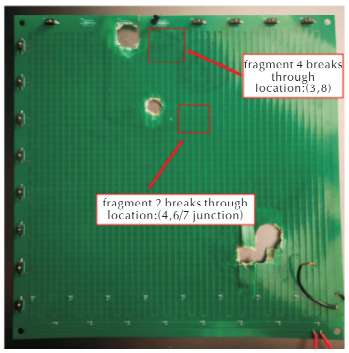
在破片群测量场景下，打击在一块靶板上的破片可能远远多于两个，并且对图 15(c)分析可以得知，当破片击穿网靶之后，仅部分测量区域失效，其余区域仍可正常工作，因此对已经进行过一次试验的靶网进行二次试验，模拟多破片着靶的情况，得到的实验结果如图 16 所示。



(a) front test circuit passes through the target signal



(b) back test circuit passes through the target signal



(c) physical picture of the target net after the fragments penetration

图 16 二次试验试验结果

Fig. 16 Test results of the secondary test

分析过靶信号波形图得到的破片着靶位置信息如表 5 所示。试验结果表明二次试验得到的破片空间分布测量结果与实际破片着靶位置一致，表明该新型双通道电阻网靶可以应用于多破片测量场景。

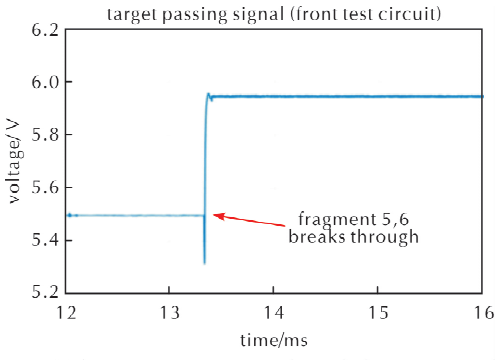
表 5 二次试验破片着靶位置信息分析表

Table 5 Analysis table of the target landing position information of the secondary test fragment

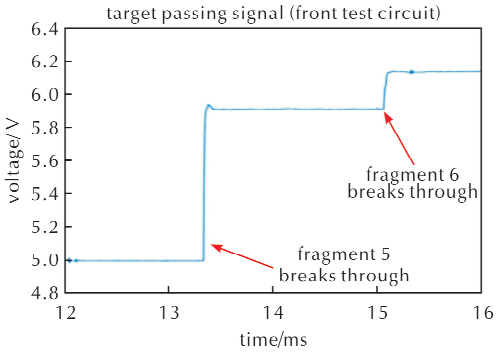
fragment number		ΔU/V	$\Delta R/\Omega$	identify location	actual location
3	*X*-axis	0.15	75	4	4
	Y-axis	1.87	935	6/7 junction	6/7 junction
4	*X*-axis	0.08	40	3	3
	Y-axis	2.41	1205	8	8

由于破片的飞散方向具有随机性，可能会出现多个破片击穿 *X* 轴或 *Y* 轴测试电路同一测试区域、击中测试电路总线等情况的出现，因此本实验也对这两种特殊工况进行了模拟。多个破片击穿靶网正面同一测试区域时，得到的实验结果如图 17 所示。

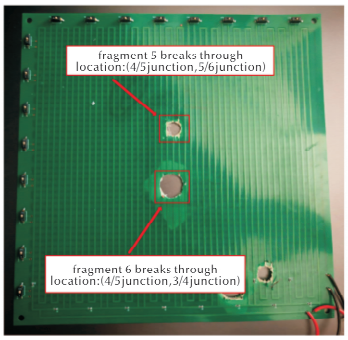
从图 17(a)和 17(b)可以看出，正面测试电路仅有一个上升沿，背面测试电路有两个上升沿，且电压均未达到满量程值，根据 1.1 小节中特殊工况数据处理方法可以判定破片 5、6 击中正面测试电路同一区域。



(a) front test circuit passes through the target signal



(b) back test circuit passes through the target signal



(c) physical picture of the target net after the fragments penetration

图 17　破片过靶信号波形图(多个破片击穿靶网正面同一测试区域)

Fig. 17　Waveform diagram of the fragment passing through the target (Multiple fragments penetrate the same test area on the front or back of the target plate)

分析过靶信号波形图得到的破片信息如表 6 所示，通过过靶波形分析得出的破片着靶位置与实际破片着靶位置一致。

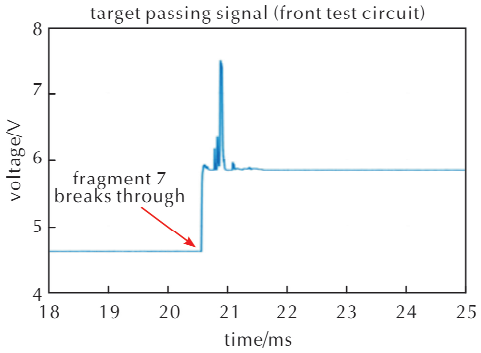
表 6　破片着靶位置信息分析表(多个破片击穿 *X* 轴或 *Y* 轴测试电路同一测试区域)

Table 6　Analysis table of Fragment hitting Target Position Information(Multiple fragments penetrate the same test area on the front or back of the target plate)

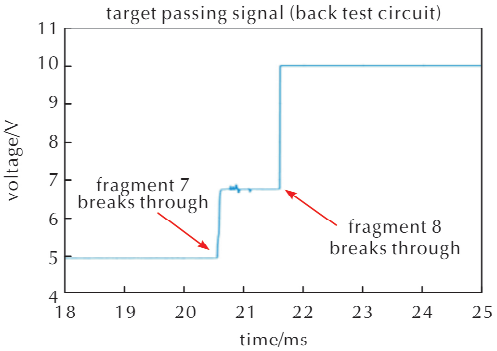
fragment number		ΔU/V	$\Delta R/\Omega$	identify location	actual location
5	*X*-axis	0.44	220	4/5 junction	4/5 junction
	Y-axis	0.91	455	5/6 junction	5/6 junction
6	*X*-axis	0	0	4/5 junction	4/5 junction
	Y-axis	0.23	115	3/4 junction	3/4 junction

破片击中靶网背面测试电路总线时的试验结果如图 18 所示。

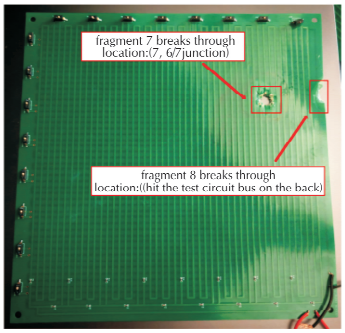
从图 18(b)可以看出，当破片 8 击穿后，反面测试电路电压值变为 10 V，达到了满量程值，根据 1.1 小节中特殊工况数据处理方法可以判定破片 8 击中背面测试电路总线。分析过靶信号波形得到的破片着靶位置信息如表 7 所示，通过过靶波形分析得出的破片着靶位置与实际破片着靶位置一致。



(a) front test circuit passes through the target signal



(b) back test circuit passes through the target signal



(c) physical picture of the target net after the fragments penetration

图 18　破片过靶信号波形图(击中背面测试电路总线)

Fig. 18　Waveform diagram of the fragment passing through the target (bus of the test circuit for hitting the back)

表 7　破片着靶位置信息分析表(击中背面测试电路总线)

Table 7　Analysis table of Fragment hitting Target Position Information (Backside Hit Test Circuit Bus)

fragment number		ΔU/V	$\Delta R/\Omega$	identify location	actual location
7	*X*-axis	1.22	610	7	7
	Y-axis	1.82	910	6/7 junction	6/7 junction
8	*X*-axis	0	0	the valid measurement area was not hit	the valid measurement area was not hit
	Y-axis	∞	∞	hit bus	hit bus

破片着靶位置识别的测量结果表明：该新型双通道电阻网靶仅需两路数据采集通道就可以对破片群中各个破片的着靶位置进行识别，并且对于

1.1 小节提到的破片击中测试电路总线、多个破片击穿 X 轴或 Y 轴测试电路同一测试区域这两种特殊工况，该靶网也可以对这两种情况进行有效判别，证明本研究的破片着靶位置识别方法是可行的。

由于本研究重点在于验证该方法的可行性，直接测量得到的过靶波形可以证明该方法是可行的，因此并未对原始过靶波形进行数据处理，但是观察实测波形（图 15 和图 16）与理想仿真波形（图 9）可以发现，实测波形中混有严重的噪声干扰，此问题是制约大规模布设场景下实现高精度机器自动识别的关键瓶颈。为解决此问题，后续研究在数据处理方面可以拟引入小波分析技术，以理想波形为参照进行信号滤波，从而显著提升信噪比，为后续的高效测量奠定数据基础。

4.2 速度测量功能验证

根据 1.2 小节破片群速度测量原理，从 4.1 小节中各个过靶波形提取各个破片过靶时间 t，通过公式（5）就可以得出各破片速度 V_1，破片速度分析结果如表 8 所示。表 8 中的参考速度 v_2 由高速摄影仪测得，从图 14(a)可知，由于高速摄影仪与该新型双通道电阻网靶同步触发，因此 v_1 和 v_2 均为破片从枪口到网靶的平均速度。

表 8 各个破片速度信息分析表

Table 8 Analysis table of the speed information of each fragment

fragment number	t/ms	v_1/(m·s^{-1})	v_2/(m·s^{-1})	δ/%
1	23.36	308.22	325.08	5.19
2	25.59	281.14	300.97	6.59
3	15.05	478.41	510.00	6.19
4	16.94	425.03	443.67	4.20
5	13.33	540.14	556.46	2.93
6	15.05	478.41	486.78	1.72
7	20.55	350.37	379.24	7.61
8	21.6	333.33	350.45	4.89

注：t 表示破片到靶时间；v_1 表示新型双通道电阻网靶计算得出的破片速度；v_2 表示高速摄影采集到的破片参考速度；δ 表示新型双通道电阻网靶计算得出的破片速度相对于高速摄影采集到的破片速度偏差百分比。

破片速度测量的试验结果表明：对于 4.1 小节中提到的 4 种工况，该新型双通道电阻网靶都可以对穿过靶网的破片速度进行测量，对比基于高速摄影获取的破片速度结果，该网靶的速度测量偏差小于 7.61%，处于合理范围之内。进一步的误差分析表明，测速偏差主要源于以下两个方面：第一，新型双通道电阻网靶的测试电路存在响应延迟，且过靶信号中存在的干扰信号，影响了破片着靶时刻的精确提取；第二，高速摄影仪轴距未严格垂直于破片飞行轨迹，进而产生的视场偏差，同样会影响测速结果。

5 结 论

（1）提出了一种基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法，通过解算过靶信号电压变化幅度和电压变化时刻，利用两路数据采集通道即可实现破片群速度和空间分布的可靠测量，着靶位置识别结果与实际基本一致，速度测量结果与高速摄影的偏差小于 7.61%。

（2）基于电阻网靶的破片群多参数少通道数测量方法能够有效识别并处理多个破片同时着靶、大尺寸破片着靶、多个破片击穿靶网正/反面同一区域、破片击中测试电路总线这些特殊工况，且着靶位置识别结果与实际基本一致。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] 汤钧晖，王金涛，沈飞，等. 钨合金破片对固体推进装置的毁伤效应实验[J]. 火炸药学报，2021，44(5)：674-679.
TANG Jun-hui, WANG Jin-tao, SHEN Fei, et al. Experiment on the destructive effect of tungsten alloy fragments on solid propulsion devices [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (*Huozhayao Xuebao*), 2021, 44(5): 674-679.

[2] 刘恒言，姬聪生，何勇，等. 周向六线起爆下杀伤战斗部的破片飞散特性[J]. 火炸药学报，2024，47(1)：72-80.
LIU Heng-yan, JI Cong-sheng, HE Yong, et al. Fragmentation characteristics of lethal warheads under circumferential six-line detonation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (*Huozhayao Xuebao*), 24, 47(1): 72-80.

[3] YU Z, SHI D. Study on fragment velocity measurement technology of prefabricated fragment warhead[C]// 2018 3rd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE 2018). Clausius: Clausius Scientific Press, 2018.

[4] YAN Z G, WU J P, HE X, et al. Review on the development of power field testing technology of high-energy warhead[C] // 2022 International Symposium on Advanced Launch Technologies. Xi′an: Xi′an Modern Control Technology Research Institute, 2023: 012159.

[5] 王高，尹国鑫，李仰军，等. 电阻网靶破片群速度测量方法[J]. 探测与控制学报，2011，33(3)：47-50.
WANG Gao，YIN Guo-xin，LI Yang-jun，et al. Measurementmethod of fragment group velocity of resistance mesh target [J]. *Journal of Detection and Control*，2011，33(3)：47-50.

[6] 马竹新，王代华，张瑞刚，等. 基于可变阻抗靶网的多通道破片测速系统[J]. 现代电子技术，2022，45(11)：83-87.
MA Zhu-xin，WANG Dai-hua，ZHANG Rui-gang，et al. Based on target variable impedance of multipass speaks the velocity-measuring system [J]. *Journal of Modern Electronic Technology*，2022，49(11)：83-87.

[7] 申景田，苏健军，姬建荣，等. 一种测量破片群着靶位置和时间的装置[J]. 宇航计测技术，2019，39(S1)：86-90.
SHEN Jing-tian，SU Jian-jun，JI Jian-rong，et al. A device for measuring the position and time of fragment cluster hitting target [J]. *Aerospace Metrology Technology*，2019，39(S1)：86-90.

[8] 张中凯. 基于 FPGA 的破片多参数测试系统研究[D]. 太原：中北大学，2022.
ZHANG Zhong-kai. Fragment multi-parameter testing system based on FPGA research [D]. Taiyuan：North University of China，2022.

[9] 申仕良，李金柱，马峰，等. 圆柱形装药爆炸驱动球形破片的飞散特性[J]. 高压物理学报，2025，39(2)：65-75.
SHEN Shi-liang，LI Jin-zhu，MA Feng，et al. Dispersion characteristics of spherical fragments driven by cylindrical charge explosion [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*，2020，39(2)：65-75.

[10] 李楚. 基于梳状靶的爆炸破片分布与速度研究[D]. 西安：西安工业大学，2022.
LI Chu. Based on the comb the explosion of the target fragment distribution and speed research [D]. Xian：Xi′an University of Technology，2022.