

doi: 10.7690/bgzdh.2022.07.019

# 基于正交分析和神经网络的截顶结构超聚能装药优化设计

张新华<sup>1</sup>, 陈浩<sup>2</sup>, 姬龙<sup>3</sup>

(1. 安徽红星机电科技股份有限公司科研一所, 合肥 231135; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;  
3. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065)

**摘要:** 为获得最优的超聚能装药结构, 通过正交分析和反向传播(back propagation, BP)神经网络对截顶结构超聚能装药各影响参数对形成射流的参数进行优化分析, 明确影响截顶结构超聚能装药侵彻威力的主要影响因素。结果表明: 当超聚能装药结构锥顶角为 $36^\circ$ , 附加装置半径为14 mm, 附加装置宽度为5 mm, 药型罩厚度为1 mm, 射流侵彻钢板数值模拟效果最好, 射流侵彻钢板的深度达到206.4 mm。

**关键词:** 超聚能装药; 射流侵彻; 正交优化设计

**中图分类号:** TJ410.3+3 **文献标志码:** A

## Optimization Design of Truncated Super Shaped Charge Based on Orthogonal Analysis and Neural Network

Zhang Xinhua<sup>1</sup>, Chen Hao<sup>2</sup>, Ji Long<sup>3</sup>

(1. No. 1 Scientific Research Institute, Anhui Hongxing Electrical Polytron Technologies Inc., Hefei 231135, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;  
3. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimal super shaped charge structure, the orthogonal analysis and back propagation (BP) neural network were used to optimize the jet formation parameters of the truncated super shaped charge, and the main factors affecting the penetration power of the truncated super shaped charge were identified. The results show that when the cone angle of super shaped charge structure is  $36^\circ$ , the radius of additional device is 14 mm, the width of additional device is 5 mm, and the thickness of liner is 1 mm, the numerical simulation effect of jet penetrating steel plate is the best, and the depth of jet penetrating steel plate reaches 206.4 mm.

**Keywords:** super shaped charge; jet penetration; orthogonal optimization design

## 0 引言

随着新材料、新技术的发展, 装甲目标的防护能力不断增强, 传统聚能装药结构已无法对装甲目标进行有效毁伤。因此俄罗斯学者 V. F. Minin 等<sup>[1-2]</sup>提出了具有更大侵彻能力的截顶结构超聚能装药结构。由于截顶结构超聚能装药的原始参数较多, 相互影响, 对结果影响规律难以准确把握; 因此, 目前国内关于超聚能装药结构及其射流效果的研究多集中于数值模拟, 以期寻找到侵彻规律。王成等<sup>[3]</sup>针对药型罩截顶加附加装置的超聚能装药结构进行了数值模拟研究, 得出截顶加附加装置的锥形药型罩形成射流的杵体长度明显比传统锥形药型罩形成的杵体短, 附加装置防止了爆轰产物的过早泄露, 压合药型罩提供了一个轴向速度。徐文龙等<sup>[4]</sup>基于 Birkhoff 定常理论, 提出一种超聚能射流形成的理论计算方法, 可以较好地给出附加装置材料、厚度

和药型罩锥度角、密度、厚度与超聚能射流速度、有效质量之间的关系。

国内关于超聚能结构的研究并不全面, 研究内容多针对于某一因素的单一控制变量, 关于超聚能结构中附加装置尺寸、锥角、药型罩厚度等多因素相互作用下对侵彻结果的影响研究不足<sup>[5]</sup>; 因此, 开展分析多因素相互作用下的各参数对超聚能射流性能的影响, 为超聚能装药结构的研究和应用提供数据支持, 具有重要意义。

## 1 正交实验法聚能装药结构优化设计

### 1.1 基于正交法的超聚能装药结构优化实验设计

选用射流长度、射流能量、射流有效质量(不含杵体)作为评判超聚能装药结构侵彻效果的指标。超聚能装药结构主要影响参数有药型罩锥角 $2\alpha$ 、附加装置尺寸(直径 $D_{ad}$ 及宽度 $\delta_{ad}$ )和药型罩厚度 $\delta$ 。笔者对所述4个参数进行优化设计, 为保证准确性,

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(11872214); 基础加强计划领域基金(2019-JCJQ-JJ-380)

作者简介: 张新华(1971—), 男, 安徽人, 硕士, 高级工程师, 从事弹药用火工品研发研究。E-mail: 9374zhangxinhua@163.com。

给予每一因素 5 个水平，其余装药结构尺寸保持不变。超聚能装药结构如图 1 所示。其中聚能装药直径  $D$ ： $\phi 56$  mm；聚能装药长度  $L$ ：110 mm；药型罩厚度  $\delta$ ：1 mm (0.7~1.1 mm)；药型罩锥角  $2\alpha$ ： $40^\circ$  ( $35^\circ\sim 60^\circ$ )；附加装置半径  $R_{ad}$ ：17 mm (15~19 mm)；附加装置宽度  $\delta_{ad}$ ：6 mm (4~8 mm)。

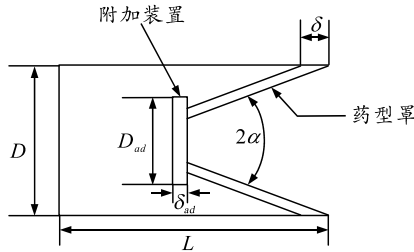


图 1 超聚能装药结构

基于正交法的 4 因素 5 水平优化实验设计如表 1 所示。

表 1 4 因素 5 水平

序号	药型罩 锥角/(°)	附加装置 半径/mm	附加装置 宽度/mm	药型罩 厚度/mm
1	35	15	4	0.7
2	40	16	5	0.8
3	45	17	6	0.9
4	50	18	7	1.0
5	60	19	8	1.1

以上 4 因素下的每一水平都可以相互组合形成一组参数，且都会对结果产生一定的影响。选用文献[6]正交表  $L_{25}(5^4)$ ，其中列号 1-4 对应  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ ，其分别表示药型罩锥角  $2\alpha$ 、附加装置半径  $R_{ad}$ 、附加装置宽度  $\delta_{ad}$ 、药型罩厚度  $\delta$ 。

### 1.2 优化参数结构数值模拟

这里通过实验 7 这一组参数模拟的结果进行说明，建模如图 2 所示。

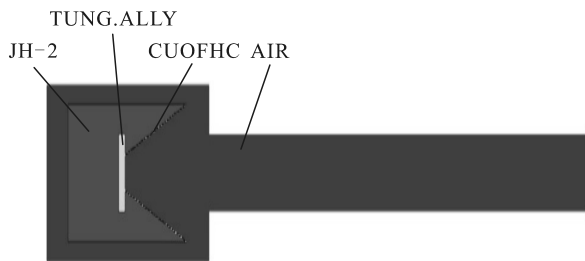


图 2 实验 7 模型

仿真结果表明：当时间到达 35  $\mu s$  时射流已完全成型，故所有实验选取 35  $\mu s$  时射流长度、能量和有效质量作为实验结果。所有实验组的数值模拟结果如表 2 所示。

### 1.3 数值模拟结果拟合及分析

笔者选择极差分析法。分析主要影响因素，对

于数值模拟直接获得的数据进行归一化处理。计算公式为：

$$X^* = (x - \min) / (\max - \min) \quad (1)$$

表 2 数值模拟结果及数值模拟数据归一化分析

实验组	长度/ mm	$W_a$	能量/ KJ	$W_b$	有效 质量/g	$W_c$	$W$
1	207.2	1.000	109	0.844	5.524	0.318	2.662
2	205.6	0.963	111	0.906	6.816	0.527	2.878
3	204.4	0.936	112	0.938	7.562	0.647	2.988
4	200.8	0.853	113	0.969	8.590	0.813	3.061
5	201.2	0.862	111	0.906	8.218	0.753	2.953
6	197.6	0.780	114	1.000	8.100	0.734	2.903
7	196.4	0.752	112	0.938	8.319	0.769	2.835
8	194.0	0.697	111	0.906	8.493	0.797	2.749
9	201.2	0.862	94	0.375	5.520	0.318	1.986
10	196.4	0.752	102	0.625	6.790	0.523	2.276
11	188.8	0.578	114	1.000	9.750	1.000	2.867
12	196.8	0.761	82	0	3.549	0	1.142
13	193.6	0.688	98	0.500	7.197	0.588	2.120
14	189.2	0.587	100	0.563	6.884	0.538	1.981
15	186.4	0.523	100	0.563	8.116	0.737	2.083
16	190.8	0.624	98	0.500	6.975	0.552	1.988
17	187.6	0.550	98	0.500	7.425	0.625	1.951
18	184.0	0.468	102	0.625	8.324	0.770	2.097
19	180.8	0.394	99	0.531	8.602	0.815	1.938
20	186.4	0.523	85	0.094	5.753	0.355	1.234
21	171.2	0.174	94	0.375	8.915	0.865	1.502
22	163.6	0	89.9	0.247	7.188	0.587	0.834
23	177.6	0.321	82	0	5.785	0.361	0.842
24	170.0	0.147	86	0.125	7.636	0.659	1.004
25	173.2	0.220	82	0	8.238	0.756	1.086

记射流长度、射流能量、射流有效质量归一化之后数值分别为  $W_a$ 、 $W_b$ 、 $W_c$ 。对于射流的侵彻效果来说，射流长度  $W_a$  有着至关重要的作用，与之相比，射流能量、射流有效质量则为次要因素。赋予这 3 项指标不同权重： $W_a:W_b:W_c=1.5:1:1$ 。

对于每一实验组，均有与之对应的侵彻效果综合指标  $W$ ，即  $W=1.5W_a+W_b+W_c$ 。 $W$  的大小意味着侵彻效果的好坏， $W$  愈大，侵彻效果愈好。计算结果如表 2 所示。

用极差法分析 4 因素对于射流侵彻效果的影响大小。确定出主要影响因素、次影响因素，为之后关于因素权重分配、神经网络优化做好准备。首先分析因素  $A$ ，可以得到  $WA_1$ 、 $WA_2$ 、 $WA_3$ 、 $WA_4$ 、 $WA_5$  计算公式为：

$$WA_1 = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5) / 5; \quad (2)$$

$$WA_2 = (W_6 + W_7 + W_8 + W_9 + W_{10}) / 5; \quad (3)$$

$$WA_3 = (W_{11} + W_{12} + W_{13} + W_{14} + W_{15}) / 5; \quad (4)$$

$$WA_4 = (W_{16} + W_{17} + W_{18} + W_{19} + W_{20}) / 5; \quad (5)$$

$$WA_5 = (W_{21} + W_{22} + W_{23} + W_{24} + W_{25}) / 5. \quad (6)$$

由此计算得到基于因素  $A$  的侵彻性能指标  $W$  的数值变化。同理计算出  $B$ 、 $C$ 、 $D$  的侵彻性能指标  $W$  的数值变化。各因素计算结果如表 3 所示。

表 3 A、B、C、D 各因素计算结果

实验组	A	B	C	D
1	2.909	2.385	1.970	1.573
2	2.550	1.928	2.129	2.053
3	2.039	2.159	2.186	2.182
4	1.841	1.994	2.006	2.316
5	1.054	1.926	2.102	2.268

分别计算表中因素 A、B、C、D 的极差 RA、RB、RC、RD:

$$RA=2.909-1.054=1.855;$$

$$RB=2.385-1.926=0.459;$$

$$RC=2.186-1.970=0.216;$$

$$RD=2.316-1.573=0.743。$$

由此可以确定, 针对于本次数值模拟, 对于成形射流的侵彻效果指标而言, 因素 A、D, 即药型罩锥角、药型罩厚度作为主要因素; 因素 B、C, 即附加装置直径、附加装置宽度作为次要因素。

由表 3 确定出最优参数组合, 即  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_4$ 、 $D_5$ 。这一组优化后的结构参数仅仅是依赖于最初所选取的因素水平, 但是否为在整个可取参数值范围内的最优结构参数是无法保证的; 因此, 需要借助神经网络来进行整个参数值范围内的优化。神经网络使用的前提条件是需要足够多的样本数据来进行学习, 故根据上述性能指标与因素的变化趋势, 使用 Matlab 软件对指标-因素(水平)样本点拟合, 并得到曲线在其范围值内的方程。利用拟合后的曲线方程产生足够多的样本数据, 即给定药型罩锥顶角参数取值范围( $35^\circ \sim 60^\circ$ ), 得到对应的  $WA_i$ ; 给定药型罩厚度取值范围(0.7~1.1 mm), 得到对应的  $WD_i$ ; 给定附加装置半径取值范围(15~19 mm), 得到对应的  $WB_i$ ; 给定附加装置宽度(4~8 mm), 得到对应的  $WC_i$ 。

为将各因素对侵彻效果性能指标  $W$  的影响联系起来, 探讨其之间的相互作用, 故需引入一个新的侵彻效果性能指标  $Y$ ; 需建立  $Y$  与  $WA_i$ 、 $WB_i$ 、 $WC_i$ 、 $WD_i$  之间的函数。在赋予权重的情况下, 建立新的侵彻效果性能指标为:

$$Y=2WA_i+2WD_i+WB_i+WC_i。 \quad (7)$$

此时, 关于侵彻效果与结构参数关系的研究可简化为: 给定 4 个因素的输入值, 判断对应的侵彻性能指标  $Y$  的大小。由于函数的构造过程,  $Y$  越大, 意味着侵彻效果越好。

## 2 基于神经网络的超聚能装药结构优化参数

利用 Matlab 神经网络工具箱中的 Neural Net Fitting 构造反向传播(BP)神经网络。为了保证所训

练的神经网络精度达到一定标准, 准备 2005 组样本数据。为使神经网络预测出的最优结构参数足够准确, 笔者选择训练 2 个互为输入输出的神经网络, 相互验证, 确保结果的可靠性。

由上文分析可知, 共有 4 组结构参数, 1 组侵彻效果综合性能指标。故神经网络 1 设置为 4 个输入, 1 个输出; 神经网络 2 设置为 1 个输入, 4 个输出。2 组神经网络均采用三层网络结构。计算隐含层节点个数:

$$K = \sqrt{m+n} + a。 \quad (8)$$

式中:  $m$  为输入层神经元个数;  $n$  为输出层神经元个数;  $a$  为介于[0~10]之间的常数。 $K$  的取值范围为[3~12]。通过重复实验验证,  $K$  取 10 时误差最小, 因此确定神经网络具有 10 个隐含节点。

1) 构建神经网络 1, 即 4 结构参数输入, 1 性能指标输出。

将 2005 组样本数据按照参数-性能指标一一对应的数据矩阵输入。神经网络 1 训练集、验证集、测试集分别选择 75%(1403)、15%(301)、15%(301)。使其进行学习得到最终的神经网络, 其学习效果由 MSE、R 判定。

当参数 MSE 接近 0, R 接近 1 时说明该网络已具有较好的学习效果; 接着, 在 Matlab 中调用该神经网络, 输入已有实验模型的结构参数, 得到性能指标, 通过比较预测指标与实验指标误差, 得到误差小于 0.2%; 因此, 可以用该训练网络来预测输入结构参数时所对应的性能指标大小。

2) 构建神经网络 2, 即 1 性能指标输入, 4 结构参数输出。

神经网络 2 的构建过程与神经网络 1 类似。由于神经网络 2 的评价参数 MSE、R 相比较于 1 网络就显得没有那么准确。所以根据实际生产条件及客观需求, 可在不改变性能指标的情况下, 合理调整结构参数, 完成设计。

3) 利用神经网络 1 和 2 获得最优结构参数解。

为使选取的结构参数符合最优解, 首先需要判断出性能指标  $Y$  可取到的最大值, 假设极端条件下,  $W$  取极大值。即  $W_a$ 、 $W_b$ 、 $W_c$  均取极大值 1, 则  $W$  的极大值  $W=3.5$ ; 同理,  $WA$ 、 $WB$ 、 $WC$ 、 $WD$  均取极大值 3.5, 则性能指标  $Y$  的最大值为  $Y=21$ 。

利用神经网络 2 反解出性能指标  $Y=21$  的情况下所应有的结构参数, 将反解出的结构参数带回神经网络 1 计算对应的性能指标值。

事实上，前文对于  $Y$  最大值的求解是建立在完全理想情况下的，然而由于实际上各因素对侵彻效果不同性能指标的影响不同，且其相互之间亦存在相互影响，故  $Y_{\max}$  仅理论上存在，其意义也只是帮助快速获得在此性能指标评判标准下所能取得的最大值，从而确定出范围，反解出结构参数，再用反解出的结构参数去计算实际情况下的  $Y_{\max}$ 。

经过大量反解代入，计算评价，最终获得一组最优解数据，如表 4 所示。

表 4 超聚能结构最优参数取值

锥顶角/ (°)	附加装置 半径/mm	附加装置 宽度/mm	药型罩 厚度/mm
36	14	5	1

将该结构参数作为输入组，通过神经网络 1 计算出来的值为  $Y=18.68$ 。

为更好地说明这是一组最优解，选择另外 3 组结构参数作为对比。对比组 1，保持锥顶角相同的反解结构参数；对比组 2，仅单次学习后的神经网络给出的最优解；对比组 3，改变锥顶角和附加装置尺寸。具体结构参数取值如表 5 所示。

表 5 对比组结构参数取值

结构参数	对比组 1 取值	对比组 2 取值	对比组 3 取值
锥顶角/(°)	36.0	37.16	37.0
附加装置半径/mm	16.0	16.30	15.0
附加装置宽度/mm	3.5	6.50	3.5
药型罩厚度/mm	1.2	0.98	1.2

### 3 基于 BP 神经网络优化结构结果分析

考虑模型模拟实际计算量，选择爆炸后 0.11 ms 作为观测时间点。射流侵彻钢板的侵彻深度为  $L_h$ ，各组实验侵彻结果记录如表 6 所示。

表 6 各实验组侵彻效果记录

实验模拟组	装药结构 方式	钢板侵彻 深度/mm	有质量 分数/%	侵彻效果 增益/%
最优组	超聚能装药	206.4	47.9	10.9
	传统装药	186.0	33.5	
对比组 1	超聚能装药	199.6	42.0	7.1
	传统装药	186.4	28.4	
对比组 2	超聚能装药	203.0	36.9	9.0
	传统装药	188.0	32.9	
对比组 3	超聚能装药	197.2	42.0	6.7
	传统装药	184.8	35.2	

从上表中可以看出，最优组结构参数下的装药结构性能指标优于其余对照组。其钢板的侵彻深度达到了最大， $L_h=206.4$ ，有效质量分数也达到了最高， $\omega=47.9\%$ 。说明基于神经网络优化出来的结构参数是众多结构参数组合中侵彻效果最好的。

### 4 结论

1) 对于成形射流的侵彻效果来说，射流长度起至关重要的作用，而射流能量、有效质量则为次要因素；笔者赋予射流长度  $W_a$ ：射流能量  $W_b$ ：射流有效质量  $W_c=1.5: 1: 1$  的权重比值是合理的，且为之后射流侵彻效果综合性能指标的计算提供基础。

2) 在所研究的 4 个结构参数中，药型罩锥角、厚度为主要因素，附加装置的尺寸为次要因素；因此，超聚能装药结构侵彻效果的关键依然在于药型罩本身的结构参数，附加装置的存在也只是在一定程度上去改善其侵彻效果，作为辅助存在。

3) 基于正交实验优化法，利用神经网络相互验证，最终得到最优结构参数解，即药型罩锥顶角取  $36^\circ$ ，厚度取 1 mm，附加装置尺寸取  $28 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ；该结构在关于钢板的侵彻数值模拟实验中效果最好，有着最强的侵彻能力。

### 参考文献：

- [1] MININ V F, MININ O V, MININ I V. Physics hypercumulation and combined shaped charges[C]//IEEE International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. Russia: Novosibirsk, 2013.
- [2] MININ V F, MININ O V, MININ I V. Some possibilities of hypercumulative regime of jet formations[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 782: 42-48.
- [3] 王成, 钱俊松, 王万军. 超聚能射流形成的数值模拟[C]//北京力学会第 20 届学术年会论文集. 北京: 北京力学会, 2014.
- [4] 徐文龙, 王成, 徐斌. 超聚能射流形成机理过程研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(2): 261-268.
- [5] 钱俊松. 超聚能装药结构优化设计及其形成机理的数值模拟研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [6] 茆诗松, 周纪芴, 陈颖. 试验设计[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012(9): 417.