

文章编号: 1001-1455(2003)05-0430-06

# 乳化粉状炸药制备的优选 BP 网络模型<sup>\*</sup>

段宝福<sup>1,2</sup>, 汪旭光<sup>3</sup>, 宋锦泉<sup>3</sup>

- (1. 辽宁工程技术大学工程爆破研究所, 辽宁 阜新 123000;
2. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;
3. 北京矿冶研究总院炸药与爆破研究所, 北京 100044)

摘要: 根据 BP(Back propagation)神经网络理论, 建立了制备乳化粉状炸药模型, 采用乳化粉状炸药研制过程中的有关数据, 编写程序进行了模型的训练、用训练后的模型对预测样本进行了预测与优选。模型优选结果的性能价格比的预测值为 2841.3 (m/s)/(¥/kg), 实验得到该结果的实际性能价格比为 2767.4 (m/s)/(¥/kg), 相对误差为 2.7%。模型还可对具有相同配方的炸药优选制备工艺参数, 对部分组分不同的样品优选了工艺参数, 模型对这些样品优选的最优工艺参数与实际工艺参数基本一致。

关键词: 爆炸力学; 优选模型; 神经网络理论; 乳化粉状炸药; 制备

中图分类号: TQ560.6; TQ564.4

国标学科代码: 130°3599

文献标志码: A

## 1 引 言

乳化粉状炸药是近年来由我国自行研制的一种新型无梯粉状硝酸炸药。它兼具了乳化炸药和粉状炸药的优点, 抗水性能好, 具有易于装填与运输的特点; 同时由于它不含梯恩梯, 不对人体和周围环境造成污染, 这使得乳化粉状炸药在工程爆破中越来越受到欢迎, 具有广阔的市场前景。因此, 如何获得质优价廉的乳化粉状炸药, 增强其市场竞争力也成了炸药研究者所关注的焦点。

炸药的性能受到配方、制备工艺等多种因素的制约, 它们之间有着复杂的内在关系。对这种多因素条件下系统内复杂的相互作用关系, 用常规的数学方法不能很好地加以描述。

人工神经网络理论的出现, 为这一问题的解决提供了有效的途径。神经网络理论是近年来得到迅速发展的一门边缘、交叉学科, 尤其适合于处理多因素条件下系统内复杂的不确定关系。本文的工作旨在利用该理论建立选取制备乳化粉状炸药的最佳组分配方和工艺参数模型。

## 2 BP 网络理论

神经网络是高度非线性的动力学系统。虽然每个神经元的结构和功能十分简单, 但大量神经元构成的网络系统的行为却是极其丰富和复杂的<sup>[1]</sup>。它具有自适应过程和学习过程, 根据网络训练样本的数据来寻找系统输入和输出的定量表达关系, 从而完成系统预测。

BP 网络是由非线性变换单元组成的具有反向传播功能的前馈网络, 是最常用的一种神经网络模型。它不仅有输入层节点、输出层节点, 而且有隐层节点(可以是一层或多层)。图 1 是一个典型的 BP 网络结构示意图。

BP 网络算法是一种建立在梯度下降法基础上的自学习算法, 如图 1 所示。输入信息从输入层经隐层单元处理, 并传向输出层, 每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态<sup>[2]</sup>。如果在输出层不能得到期望的输出, 则转入反向传播, 将误差信号沿原来的连接通路返回, 通过修改各层神经元权值, 使得误差信号最小。

\* 收稿日期: 2002-10-10; 修回日期: 2002-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50174008)

作者简介: 段宝福(1972—), 男, 博士研究生, 讲师。

设网络有  $p$  个输入样本, 输入向量为  $X^k (k=1, 2, \dots, p)$ , 期望输出向量  $T^k (k=1, 2, \dots, p)$ 。那么 BP 网络的算法步骤可描述如下:

(1) 将网络初始化, 给连接权和阈值随机赋初值。

(2) 输入学习样本, 并按式

(1)、(2) 计算各层输入、输出。

$$u_j^k = \sum_i W_{ij} o_i^k - \theta_j \quad (1)$$

$$o_i^k = f(u_i^k) =$$

$$f\left(\sum_i W_{ij} o_i^k - \theta_j\right) \quad (2)$$

式中:  $W_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的连接权;  $\theta_j$  为节点  $j$  的阈值; 下标  $i$  为上一层节点, 下标  $j$  为与  $i$  相邻的下一层节点;  $f(\cdot)$  为节点作用函数, 可以是 S 型非线性函数, 也可以是线性函数。

(3) 按式 (3) 计算网络总误差  $E$ , 如总误差  $E \geq e_0$  ( $e_0$  为整体期望误差), 或者个体误差  $E_k = |t_i^k - y_i^k| \geq e$  ( $e$  为个体期望误差,  $t_i$  为模型的期望输出,  $y_i$  为模型的实际输出), 转到步骤 4; 否则说明满足要求, 网络输出。

$$E = \sum_{k=1}^p E_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (t_i^k - y_i^k)^2 \quad (3)$$

(4) 利用式 (4) 计算各层梯度误差  $\delta$ , 然后通过式 (5) 修正权值。

$$\frac{\partial E_k}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial E_k}{\partial u_j^k} \cdot \frac{\partial u_j^k}{\partial W_{ij}} \quad (4)$$

$$W_{ij}^{(c+1)} = W_{ij}^{(c)} + \eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = W_{ij}^{(c)} + \eta \sum_{k=1}^p \delta o_i^k \quad (5)$$

式中:  $\eta$  为学习步长;  $\delta$  为梯度修正误差,  $\delta = \partial E_k / \partial u_j^k$ ; 上标  $c$  为迭代次数。

### 3 神经网络模型的结构

#### 3.1 输入层节点的确定

要制备出价格低廉的优质炸药, 不但要考虑炸药的配方, 还应该考虑制备工艺。因此, 需根据乳化粉状炸药的性能价格比受到炸药配方 (各组分及其含量)、制备工艺 (包括加料速度、乳化温度、搅拌速度、喷雾压力) 等多种因素控制的特点, 来建立其制备优选的神经网络模型。

乳化粉状炸药的主要组分包括: 硝酸盐、水、乳化剂、复合油相和添加剂<sup>[3]</sup>, 其配方见表 1。

加料速度、乳化温度、搅拌速度 (常指搅拌器的转速) 和喷雾压力是乳化粉状炸药制备过程中起着重要作用的参数, 在制备优选模型中需加以考虑, 其取值范围见表 2。

炸药组分的含量和制备工艺参数一起构成了系统的影响因素, 将以上这 9 个因素作为模型的输入节点, 即模型有 9 个输入节点。

表 1 乳化粉状炸药的组分及含量

Table 1 The components and their contents of PEE

硝酸盐	水	乳化剂	复合油相	添加剂
/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)	/ (%)
87~93	0~8.0	1.5~2.5	3.6~5.5	0.1~0.5

表 2 乳化粉状炸药的制备工艺参数

Table 2 The preparation processes parameter of PEE

加料速度	乳化温度	搅拌速度	喷雾压力
/ (g/s)	/ °C	/ (r/s)	/ (MPa)
55~110	110~150	10~16	0.1~0.5

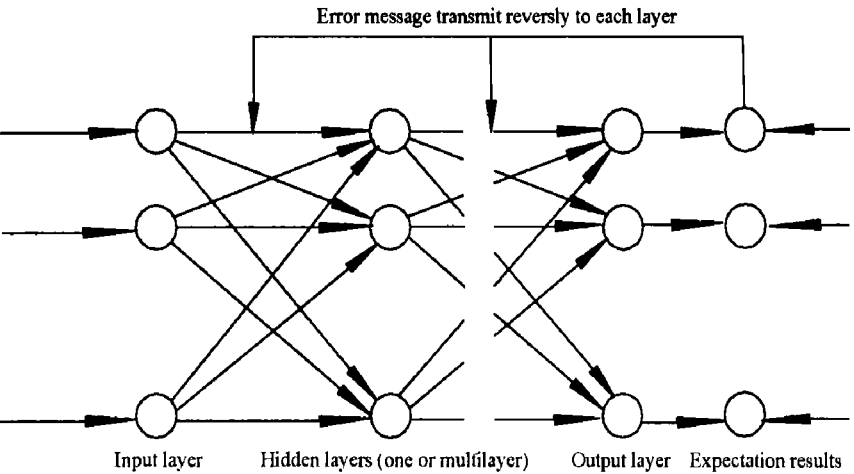


图 1 BP 网络结构示意图

Fig.1 The sketch of BP net

### 3.2 输出层节点的确定

产品的优选不仅要考虑其性能,同时还应该考虑到生产成本,所以,在乳化粉状炸药优选时,应该将产品的爆炸性能价格比作为衡量指标。可以用来评价炸药爆炸性能的指标很多,如爆热、爆容、爆速、猛度等。由于爆热、爆容的计算与测量都比较麻烦且误差很大,而爆速的测量相对较容易,且测量手段已比较成熟,爆破工作者或研究人员常用它来评价炸药的性能。将爆速  $D$  与产品成本  $P$  的比值  $D/P$  (单位:  $(\text{m/s})/(\text{¥/kg})$ ) 作为乳化粉状炸药的性能价格比,且爆速可现场测定。

由于只选取性能价格比来评价不同组分、不同制备工艺条件下产品的优劣,用它作为模型的输出,即模型只有一个输出节点。

### 3.3 隐层节点的确定

Rebert<sup>[4]</sup>证明,在一定范围内,用含有一个隐层的 BP 网络可以完成任意  $n$  维到  $m$  维的映射。所以,在乳化粉状炸药的制备优选模型中选用含有一个隐层的 BP 网络。

隐层节点的数目没有理论上的计算公式,只能根据经验公式来选取<sup>[4]</sup>,见式(6)。

$$n = \sqrt{m + l} + a \quad (6)$$

式中:  $n$  为隐层节点的数目;  $m$  为影响炸药性能价格比的因素个数,即输入层节点的数目;  $l$  为输出层节点数目,模型中只有性能价格比这一个节点;  $a$  为 1~10 之间的常数。

隐层节点数越多,网络的预测效果越好,隐层节点数一般不少于输入层和输出层的节点数。根据式(6),取隐层节点数为 12。

根据以上分析,模型的结构已经确定,它是一个 3 层 BP 网络模型,包含 9 个输入节点,分别代表硝酸盐、水、乳化剂、复合油相、添加剂、加料速度、乳化温度、搅拌速度和喷雾压力;一个输出节点,代表乳化粉状炸药的性能价格比(指爆速与成本的比值);12 个用来保证网络计算精度的隐层节点。

很显然,模型输入层与隐层的连接权是一个  $9 \times 12$  阶矩阵,隐层与输出层的连接权是一个含有 12 个元素的向量。

## 4 优选模型的应用

### 4.1 模型训练

由于优选模型的结构已经确定,只要选择训练样本,就可以根据模型的结构和模型算法进行训练。训练样本越多,模型的精度也越高。根据对乳化粉状炸药研究过程中所积累的数据,选择了 20 个样本作为模型的训练样本,样本数据见表 3。

表 3 模型训练样本数据

Table 3 The training data of model

样本 编号	组分含量/(%)					制备工艺参数				性能价格比/ [(m/s)/(¥/kg)]
	硝酸盐	水	乳化剂	复合油相	添加剂	加料速度 /(g/s)	乳化温度 /°C	搅拌速度 /(r/s)	喷雾压力 /MPa	
1	87	6.5	1.8	4.5	0.2	110	130	10	0.2	2150.7
2	88	6.0	1.7	4.0	0.3	80	130	13	0.4	2179.5
3	89	2.9	2.6	5.0	0.5	110	120	10	0.4	1992.7
4	93	1.5	1.6	3.7	0.2	110	140	10	0.3	1974.3
5	89	4.3	1.9	4.5	0.3	80	140	13	0.3	1509.4
6	88	4.4	2.0	5.4	0.2	80	140	13	0.2	1541.9
7	88	4.8	2.3	4.5	0.4	55	140	13	0.3	1353.0
8	90	3.3	2.5	4.0	0.2	110	120	10	0.5	2102.7
9	93	1.7	1.5	3.6	0.2	80	130	10	0.2	2350.8
10	88	4.8	1.8	5.0	0.4	80	140	10	0.5	1377.5

续表 3

样本 编号	组分含量/(%)					制备工艺参数				性能价格比/ [(m/s)/(¥/kg)]
	硝酸盐	水	乳化剂	复合油相	添加剂	加料速度 /(g/s)	乳化温度 /°C	搅拌速度 /(r/s)	喷雾压力 /MPa	
11	89	4.5	2.2	3.8	0.5	110	120	13	0.1	1909.1
12	89	4.5	1.6	4.8	0.1	110	140	13	0.2	1772.0
13	89	5.0	1.8	3.9	0.3	110	140	10	0.2	2271.2
14	89	3.6	2.2	5.0	0.2	80	140	13	0.2	1307.3
15	92	2.4	1.6	3.8	0.2	110	120	13	0.2	2006.2
16	87	5.1	2.3	5.1	0.5	80	120	13	0.2	2453.6
17	88	6.3	1.7	3.6	0.4	80	140	13	0.2	2051.4
18	92	2.6	1.5	3.8	0.1	55	120	16	0.2	1444.6
19	90	4.7	1.5	3.6	0.2	110	140	16	0.1	2227.5
20	91	3.1	1.8	3.8	0.3	110	140	13	0.3	2171.4

对模型的训练、预测和优选进行了相应的编程计算, 由于模型的输出是任意数值, 故输出层的节点作用函数选用线性函数, 隐层的节点作用函数选用 S 型非线性函数。由于各输入节点的取值范围相差很大, 为了减少计算次数, 保证算法的收敛性, 在计算前对输入数据做预处理, 使各节点的输入值相差不致太大。

训练时模型精度取 0.001, 学习步长选 0.05。经过几千次迭代后, 精度达到要求, 训练完毕。此时, 模型各节点的连接权值已确定, 可以随时进行同类型样本的预测。

#### 4.2 模型预测与优选

为了优选乳化粉状炸药配方的组分含量和工艺参数, 就需要根据配方的组分含量和工艺参数的取值范围, 对模型各因素利用逐项密集扫描技术取值, 作为模型的预测样本。只有保证了预测样本的全面性, 才能选出最优配方的组分含量和工艺参数。由于输入因素多, 预测样本的数量自然也很多, 利用计算机对 9 个因素依次取值, 并自动剔除不合要求的数据。将选取的预测样本直接输入模型进行预测, 即可得到所有预测样本的性能价格比。

表 4 列出了模型计算的部分结果, 表中 20 个样本由计算机从预测好的样本集中随机抽取获得。

表 4 模型预测部分结果

Table 4 Some predicted results of model

样本 编号	组分含量/(%)					制备工艺参数				性能价格比/ [(m/s)/(¥/kg)]
	硝酸盐	水	乳化剂	复合油相	添加剂	加料速度 /(g/s)	乳化温度 /°C	搅拌速度 /(r/s)	喷雾压力 /MPa	
1	90	4.3	2.0	3.5	0.2	80	140	10	0.3	2443.4
2	90	3.4	2.2	4.0	0.4	80	130	13	0.1	1948.4
3	89	5.1	1.9	3.8	0.2	80	140	13	0.4	2086.2
4	92	2.4	1.8	3.6	0.2	110	110	16	0.4	2152.7
5	93	1.9	1.5	3.5	0.1	110	130	13	0.1	1946.7
6	89	3.8	2.3	4.5	0.4	110	120	10	0.1	1622.8
7	90	3.7	2.2	3.8	0.3	80	130	10	0.2	2124.2
8	91	2.1	2.1	4.6	0.2	110	130	13	0.1	1514.4
9	90	3.6	2.0	3.9	0.5	80	140	13	0.3	2091.1
10	87	6.4	1.8	4.3	0.5	110	150	13	0.4	1256.7
11	93	1.4	1.7	3.5	0.4	80	120	13	0.4	2563.8
12	91	2.8	1.5	4.4	0.3	80	120	16	0.2	1930.8
13	91	3.0	1.6	4.0	0.3	80	120	10	0.2	2731.4
14	91	3.7	1.6	3.5	0.2	110	120	13	0.2	1905.4

续表 4

样本 编号	组分含量/(%)					制备工艺参数				性能价格比/ [(m/s)/(¥/kg)]
	硝酸盐	水	乳化剂	复合油相	添加剂	加料速度 /(g/s)	乳化温度 /°C	搅拌速度 /(r/s)	喷雾压力 /MPa	
15	92	2.1	1.7	4.0	0.2	80	130	16	0.3	1902.8
16	90	3.7	1.8	4.2	0.3	80	120	13	0.3	2369.2
17	87	7.0	2.0	3.8	0.2	80	120	10	0.4	2791.0
18	93	1.4	1.9	3.5	0.2	80	110	13	0.1	2042.3
19	90	3.3	1.9	4.5	0.3	80	120	16	0.1	1975.0
20	91	3.5	1.5	3.6	0.4	110	120	16	0.3	2278.9
优选 结果	91	3.0	1.7	4.0	0.2	110	130	10	0.2	2841.3

模型的优选可由计算机自动完成,使计算机通过事先编制的程序从样本预测值中选取最大的性能价格比,它对应的炸药配方组份含量与工艺参数就是相应的最优配方组份含量与工艺参数。至此,就建立了乳化粉状炸药制备的优选 BP 网络模型。

经计算得出的最优配方与工艺参数见表 4。通过对该配方产品的现场实验与计算,得到实际性能价格比为为 2767.4(m/s)/(¥/kg),与模型预测值的相对误差为 2.7%。

#### 4.2 相同配方样品制备工艺参数的优选

通过模型可以为具有相同配方的炸药选择最佳的制备工艺参数,具体方法:首先给定配方组份含量,让计算机对工艺参数逐项取值,这样就得到了一系列相同配方但制备工艺参数不同的样本,把它们输入训练好的模型进行预测,根据预测到的最佳性能价格比,即可得到相应配方的最佳工艺参数,实现制备工艺的优选。这也是本模型计算程序中的一个子程序。

对乳化粉状炸药研究过程中用到的五个不同配方做了工艺参数的优选,其结果见表 5。表 5 也列出了这五个样本的实验结果,当然也是实验过程中五种产品的最好性能,这些结果与模型的预测值相差不大。表中优选的工艺参数也基本上与模型优选结果中的最选工艺参数是一致的。这说明利用模型为已知配方的炸药优选工艺参数还是相当可靠的。

表 5 相同配方样品制备工艺参数的优选结果

Table 5 Optimized results of preparation parameters of some samples with same contents

样本 编号	组分含量/(%)					制备工艺参数				性能价格比/ [(m/s)/(¥/kg)]	
	硝酸盐	水	乳化剂	复合油相	添加剂	加料速度 /(g/s)	乳化温度 /°C	搅拌速度 /(r/s)	喷雾压力 /MPa	预测	实验
										结果	结果
1	89	4.5	2.3	3.8	0.4	80	130	10	0.2	2466.2	2320.1
2	91	2.7	2.4	3.6	0.3	110	130	10	0.3	2543.7	2496.6
3	90	2.5	1.7	4.5	0.3	110	130	10	0.3	2321.8	2443.3
4	89	4.0	2.1	4.5	0.4	110	130	10	0.2	2622.8	2459.9
5	90	3.7	2.2	3.8	0.3	110	130	10	0.2	2494.5	2598.4

从表 5 中有关数据发现,对不同配方优选的最佳工艺参数来说,乳化温度与搅拌速度的取值都是一样的,只有加料速度与喷雾压力稍有变化,说明在这四个工艺参数中,乳化温度与搅拌速度对乳化粉状炸药的制备显得更为重要些,这与实际情况也是相符的。

## 5 结 论

经过模型的应用,并将其优选结果与其实验结果相比较,可得出以下结论:

(1)通过实测和计算知,优选结果对应的产品实际性能价格比为 2767.4 (m/s)/(¥/kg),与模型预测值的相对误差为 2.7%,表明预测优选模型的精度较高,在乳化粉状炸药的制备中值得做参考依据。

(2)对相同配方的炸药,可通过该模型得出最优制备工艺参数。对性能最好的 5 种配方做了工艺参数的优选,模型优选结果基本上与最优工艺参数是一致的。这些配方最优工艺参数下预测的性能价格比与其实验值也很接近,充分表明通过优选模型来确定不同配方的制备工艺参数是十分可靠的。

(3)本模型采用了区间密集扫描技术对各输入节点取值,由于输入节点较多,得出的样本也很多,使计算量加大,似乎是本模型的缺点。但在某种程度上也反映了模型选取样本的全面性,从而保证了优选模型的可靠性。

## 参考文献

- [1] 张承福.神经网络系统[J].力学进展,1988,18(2):145—159.  
ZHANG Cheng-fu. Neural network system[J]. Advances in Mechanics, 1988, 18(2):145—159.
- [2] Young M T, Blanchard S M, White M W, et al. Neural networks with robust back-propagation learning algorithm[J]. Computer and Biomedical Research, 2000, 33(1):43—58.
- [3] WANG Xu-guang, SONG Jin-quan, DUAN Bao-fu. Study on powdered emulsified explosives[A]. WANG Xu-guang. The 7th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting[C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 47—49.
- [4] 张立明.人工神经网络的模型及其应用[M].上海:复旦大学出版社,1992:43—60.

## A BP net model of optimizing selection for preparation of powdery emulsion explosives

DUAN Bao-fu<sup>1,2,\*</sup>, WANG Xu-guang<sup>3</sup>, SONG Jin-quan<sup>3</sup>

(1. *Engineering Blasting Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;*

2. *Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083, China;*

3. *Explosive and Blasting Institute, Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, Beijing 100044, China*)

**Abstract:** An optimizing selection model for preparation of PEE (Powdery Emulsion Explosives) is proposed based on the BP (Back Propagation) net theory. The model has been trained using the data from PEE manufacturing practice. Then it is used for optimizing test samples. The optimized value of the capability to cost ratio is about 2841.3 (m/s)/(¥/kg), with a relative error of only 2.7% compared with the actual value, i. e., 2767.4 (m/s)/(¥/kg). The model can also be used to optimize the manufacturing parameters for explosives of the same prescription. The optimized parameters are very close to those from practice, demonstrating the capability of the model.

**Key words:** mechanics of explosion; optimizing selection model; the neural network theory; powdery emulsion explosives; preparation;

\* Corresponding author; DUAN Bao-fu E-mail address: fu1972@163.com; Telephone: 010-68333366-4410