

文章编号: 1006-9941(2010)04-0409-05

# 基于感知器仿真的底排药剂燃烧状态预测模型

张领科, 周彦煌, 余永刚, 赵 威

(南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 以往研究表明,底排药剂在瞬态卸压工况下的燃烧行为分为稳定复燃、低频振荡燃烧和永久熄灭三种状态;具体燃烧状态主要由卸压前最大压力(20~90 MPa)和最大卸压速率( $1.2 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )决定,三种燃烧状态与两者之间的对应关系基本上是线性可分的模式。为了预测不同瞬态卸压工况下的底排药剂燃烧状态,本研究基于神经网络理论,建立了单层和双层感知器神经网络模型并利用试验数据对模型进行训练,得到了包含卸压前最大压力与卸压过程中最大卸压速率的底排药剂瞬态卸压工况下燃烧状态界定判据。采用蒙特卡罗随机抽样的方法验证了所建立的感知器神经网络模型的正确性与可靠性,可以用来对瞬态卸压工况下的底排药剂燃烧状态进行预测。

**关键词:** 兵器发射理论与技术; 燃烧状态; 底排药剂; 感知器仿真; 分类判据

**中图分类号:** TJ5; TJ413+.5

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.012

## 1 引言

远程精确打击是陆军未来发展的重要方向。底排和底排-火箭复合增程技术是提高弹丸射程的重要途径,已在火炮武器系统中得到广泛应用。实践表明,底排和底排-火箭复合增程弹射程纵向散布通常约为常规制式弹箭的两倍,甚至更大,如何改善其射击精度已成为世界各国弹箭工作者的一个重要研究方向<sup>[1]</sup>。

研究发现,引起底排弹射程散布较大的一个重要原因是底排弹出膛口瞬态卸压造成底排药剂(BBP)燃烧的不一致性<sup>[2]</sup>。陆春义等人<sup>[2-3]</sup>采用半密闭爆发器模拟底排弹出膛口瞬态卸压工况,研究了复合底排药剂的燃烧行为,认为存在三种燃烧状态:持续燃烧或稳定复燃、低频振荡燃烧的临界状态和永久熄灭。分析发现,模拟底排药柱出膛口瞬态卸压工况下的燃烧状态与对应的膜片破膜时初始压力和卸压过程中最大降压速率 $\text{lap}/\text{atl}_{\text{max}}$ 基本呈线性可分模式。

本研究建立了对线性可分模式具有很好分辨能力的感知器神经网络模型,采用阈值型阶跃函数作为传递函数,最速梯度训练算法和 $\delta$ 学习规则,将底排药剂燃烧状态与燃烧工况关系试验数据作为输入训练样本,通过计算仿真获得稳定可靠的底排药剂瞬态卸压

燃烧状态预测模型,可用于对试验工况或实际射击条件下的底排装置出膛口燃烧状态进行预测,指导未来底排装置的改进。

## 2 感知器神经网络模型的建立

1958年,美国学者罗森布拉特(F. Rosenblatt)提出了感知器神经网络模型(Perceptron)。在解决线性可分的问题时,该网络模型具有运算速度快和性能可靠的特点<sup>[4-5]</sup>。

感知器神经网络主要用来对样本进行线性分类和确定划分边界,网络的输出通常用0或1表示,传递函数一般为阈值型阶跃函数,如式(1)所示。

$$f(u) = \begin{cases} 1 & u \geq 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases} \quad (1)$$

感知器神经网络采用 $\delta$ 学习规则,根据输出节点的外部反馈来改变权值,按局部改善最大的方向一步步优化,最终找到全局最优值。若以 $t$ 表示目标输出, $a$ 表示网络实际输出,网络训练的过程就是不断调整权值 $IW$ 与 $LW$ 及阈值 $b$ 的过程,使得 $e = t - a \rightarrow 0$ 。若设训练样本集为 $\{\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_n, t_n\}\}$ ,各层感知器神经元权值与阈值按式(2)调整。

$$\begin{cases} W(k+1) = W(k) + ep^T \\ b(k+1) = b(k) + e \end{cases} \quad (2)$$

式中, $e$ 为误差向量, $W$ 为权值向量, $b$ 为阈值向量, $p$

收稿日期: 2009-10-16; 修回日期: 2009-12-20

作者简介: 张领科(1978-),男,博士,从事现代火炮新型发射技术、底排药柱燃烧一致性及稳定性控制技术研究。e-mail: mustzlk@126.com

为输入向量,  $k$  为训练学习过程步数。

感知器模型分为单层和多层两种神经网络模型, 图 1 所示的是多层感知器神经网络模型, 对于单层感知器神经网络模型, 不包含输入层经元部分。

### 3 瞬态卸压工况下底排药剂燃烧状态

为了获得复合底排药剂在瞬态卸压条件的燃烧行为影响因素, 陆春义等人<sup>[2-3]</sup>采用在半密闭爆发器燃烧室内装入底排药剂样品、4/7 主装药及点火药包, 喷口处固定黄铜剪切膜片的实验装置, 利用脉冲点火器

点燃硝化棉点火药包并点燃 4/7 主装药, 直至底排药柱样品全面着火燃烧。当燃烧室内压力达到一定值, 剪切膜片瞬间被打开, 形成瞬态卸压工况; 借助压力测试系统记录燃烧室内压力变化, 借助高速录像系统分析底排药剂燃烧行为状态。通过改变 4/7 主装药药量、剪切膜片厚度与喷口直径模拟不同的卸压工况。分析得到了不同情况下破膜初始压力  $p_{\max}$  与最大降压速率  $|\partial p / \partial t|_{\max}$  对应的底排药剂持续燃烧或可靠复燃、低频振荡燃烧临界状态和永久熄灭三种状态, 部分试验结果<sup>[1-2]</sup>见表 1, 绘制的散点图如图 2 所示。

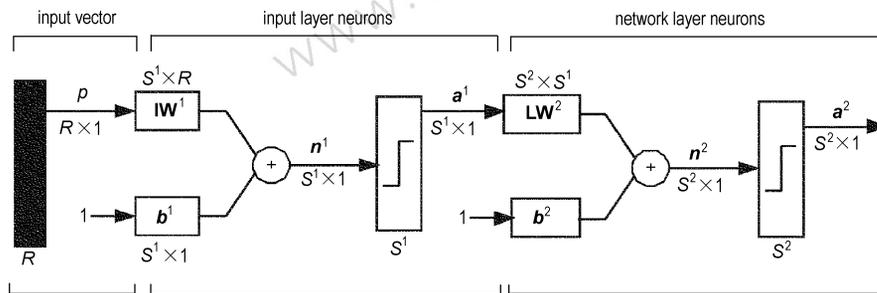


图 1 多层感知器神经网络模型

Fig. 1 Neural network model of multilayer perceptron

表 1 复合底排药剂瞬态卸压工况燃烧状态试验结果

Table 1 Experimental results of combustion state of BBP under transient depressurization

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$p_{\max} / \text{MPa}$	90.3	85.8	35.8	64.7	44.5	51.1	56.8	61.2	82.9	37.2	46.2
$ \partial p / \partial t _{\max} / \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$	1.2	2.1	3.4	3.8	4.5	5.7	6.2	4.2	5.3	0.5	0.8
state	R	R	E	C*	E	E	E	C	E	R	R
No.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$p_{\max} / \text{MPa}$	62.4	26.7	22.2	72.4	63.7	78.6	20.1	37.1	76.0	80.1	88.3
$ \partial p / \partial t _{\max} / \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$	1.1	0.4	0.4	1.3	2.3	2.6	0.5	3.3	2.7	4.6	11.2
state	C*	R	R	R	C*	R	R	C*	C*	C	E

Note: 1) R represents reignition. E represents extinguish. C represents critical. 2) all of the C with "\*" could be trending to reignition<sup>[2]</sup>.

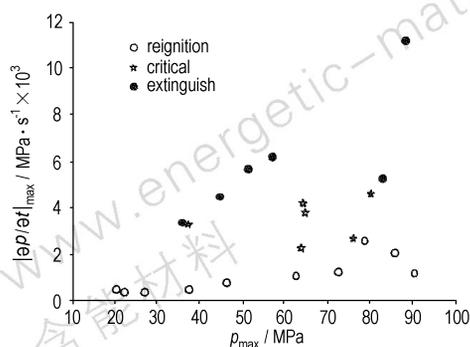


图 2 底排药剂瞬态卸压燃烧状态关系图

Fig. 2 Combustion state of base bleed propellant under transient depressurization

从图 2 中可以看出, (1) 若忽略临界状态, 仅考虑破膜时初始压力  $p_{\max}$  与最大降压速率  $|\partial p / \partial t|_{\max}$  对应的底排药剂在瞬态卸压工况下持续或可靠复燃以及永久熄灭两种状态之间存在可分界线, 确定其分类决策边界; (2) 若考虑临界状态区域, 完全用直线划分三种状态是不可能的; 但对于 12 号数据, 由文献[1]可知, 根据其发展趋势, 可将其归于复燃状态。因此, 完全可以利用直线边界将三种状态分开, 确定其分类决策边界。

### 4 感知器神经网络仿真

如前所述,单层感知器神经网络模型可用来对单一线性可分的两类模式识别;多层感知器神经网络模型可用来对多类线性可分模式识别。因此,对于底排药剂在瞬态卸压工况的燃烧状态分类与破膜前初始压力  $p_{max}$  和最大降压速率  $|\partial p/\partial t|_{max}$  的对应关系,通过建立不考虑与考虑临界状态的单层和二层感知器神经网络模型并利用试验数据对网络进行训练,可以获得性能稳定可靠的底排药剂在瞬态卸压工况的燃烧状态预测模型,同时确定归属类判决边界表达式,即燃烧状态判据,用来对其他燃烧工况下的底排药剂燃烧状态进行预测和判定。

#### 4.1 单层感知器神经网络仿真

在 Matlab 神经网络工具箱中有单层感知器模型。假设复燃状态为 1,永久熄灭状态为 0,按 MATLAB 格式输入训练样本为向量如式(3)所示。输出目标样本向量如式(4)所示。

$$p = \begin{bmatrix} 90.3 & 1.2; & 85.8 & 2.1; & 37.2 & 0.5; & 46.2 & 0.8; \\ 26.7 & 0.4; & 22.2 & 0.4; & 72.4 & 1.3; & 78.6 & 2.6; \\ 20.1 & 0.5; & 35.8 & 3.4; & 44.5 & 4.5; & 51.1 & 5.7; \\ 56.8 & 6.2; & 82.9 & 5.3; & 88.3 & & & 11.2 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (4)$$

传递函数为 hardim,学习函数为 learnp,通过 3 步网络学习和训练,网络性能函数指标 MES 达到 0,经过仿真,输出结果与目标函数一致。实践发现,每次程序运行都能获得满意的分类界线,根据试验结果分析,选择较能反映实际情况的仿真结果,具体分类界线与划分情况如图 3 所示。

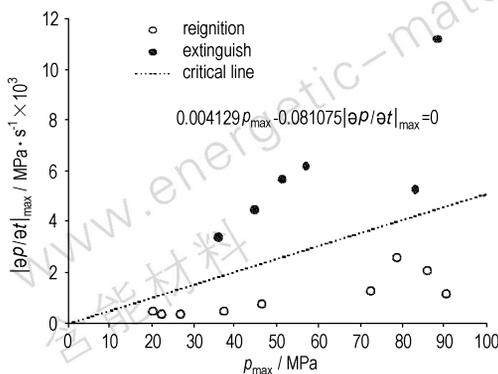


图 3 单层感知器分类情况  
Fig.3 Classification results of single layer perceptron

由分界线方程整理得到底排药剂卸压工况下复燃与永久熄灭的界定判据如式(5)所示。

$$\begin{cases} |\partial p/\partial t|_{max} - 0.05093 p_{max} \geq 0 & \text{熄灭} \\ |\partial p/\partial t|_{max} - 0.05093 p_{max} < 0 & \text{复燃} \end{cases} \quad (5)$$

#### 4.2 二层感知器神经网络仿真

若要将底排药剂瞬态卸压工况下的三种典型燃烧状态进行线性分类,则最少需要两条直线,二层感知器神经网络模型即可满足要求。Matlab 神经网络工具箱中没有现成的二层感知器神经网络模型,但借助单层感知器模型的组合可实现二层感知器神经网络模型的功能,具体方法如下<sup>[4]</sup>:

(1) 将随机感知器层设计为神经网络的第一层,包含 2 个神经元,权值和阈值均随机赋值,且对其不进行训练,对于各输入元素,其输出随机;

(2) 第二层感知器只有一个神经元,将第一层随机感知器的输出作为第二层感知器的输入,并对应输入模式,确定第二层感知器的目标向量,然后对第二层感知器进行训练;

(3) 因第一层感知器的输出随机,故在训练过程中,整个网络训练误差性能指标很难一次满足,需将第一层感知器初始化函数设置为随机函数,反复对网络模型进行学习训练,直到整个网络性能函数指标 MES 为 0 或小量 ( $\leq 1.0e-10$ )。

将 12 号视为复燃状态,假设复燃状态与永久熄灭状态对应输出为 1,临界状态对应输出为 0。按 MATLAB 格式输入训练样本为向量如式(6)所示,输出目标样本向量如式(7)所示。

$$p = \begin{bmatrix} 90.3 & 1.2; & 85.8 & 2.1; & 37.2 & 0.5; & 46.2 & 0.8; \\ 26.7 & 0.4; & 22.2 & 0.4; & 72.4 & 1.3; & 78.6 & 2.6; \\ 20.1 & 0.5; & 62.4 & 1.1; & 35.8 & 3.4; & 44.5 & 4.5; \\ 51.1 & 5.7; & 56.8 & 6.2; & 82.9 & 5.3; & 88.3 & 11.2; \\ 64.7 & 3.8; & 64.2 & 4.2; & 63.7 & 2.3; & 37.1 & 3.3; \\ 76.0 & 2.7; & 80.1 & & & 4.6 & & \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

传递函数为 hardim,学习函数为 learnp,经过反复调整运行程序 126 次,8 步网络学习和训练,网络性能函数指标 MES 达到  $1.2e-10$ ,经过仿真,输出结果与目标函数一致。获得的分类界限直线方程如式(8)所示,具体分类界线与划分情况如图 4 所示。

$$\begin{cases} |\partial p / \partial t|_{\max} - 0.04078 p_{\max} - 1.88751 = 0 & \text{临界上限} \\ |\partial p / \partial t|_{\max} - 0.03558 p_{\max} + 0.09561 = 0 & \text{临界下限} \end{cases} \quad (8)$$

因此,底排药剂瞬态卸压工况下复燃、临界和永久熄灭三种状态关于破膜前初始压力与最大卸压速率的界定判据如式(9)所示。

$$\begin{cases} |\partial p / \partial t|_{\max} - 0.04078 p_{\max} - 1.88751 \geq 0 & \text{熄灭} \\ \left( \begin{array}{l} |\partial p / \partial t|_{\max} - 0.04078 p_{\max} - 1.88751 < 0 \text{ 且} \\ |\partial p / \partial t|_{\max} - 0.03558 p_{\max} + 0.09561 \geq 0 \end{array} \right) & \text{临界} \\ |\partial p / \partial t|_{\max} - 0.03558 p_{\max} + 0.09561 < 0 & \text{复燃} \end{cases} \quad (9)$$

### 4.3 神经网络模型验证

采用蒙特卡罗法进行随机抽样验证所建立的感知器神经网络模型的可靠性。用变量  $X$  与  $Y$  分别表示破膜前初始压力  $p_{\max}$  与最大降压速率  $|\partial p / \partial t|_{\max}$ , 其单位和量级与文中试验数据相同。设  $X \sim U(5, 120)$ ,  $Y \sim U(2, 15)$ , 各抽取 100 个样本数据, 随机配对样本  $(x_i, y_i)$ , 其中  $i = 1 \sim 100$ 。采用基于式(9)的界定判据所建立的二层感知器神经网络, 对随机抽样的配对数据  $(x_i, y_i)$  进行状态判定并进行分类, 如图 5 所示。

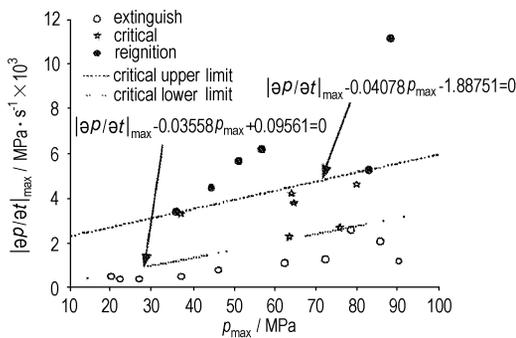


图 4 二层神经网络分类情况

Fig. 4 Classification results of double layers perceptron

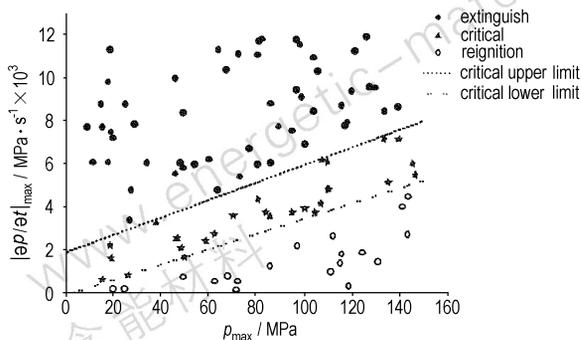


图 5 界定判据对随机抽样数据作出的分类情况

Fig. 5 Classification results of random sampling data based on the definition criterion

由图 5 可以看出,随机抽样样本已被恰当明确分类,接近试验数据的随机样本所对应的燃烧状态一致,表明所建立的二层感知神经网络是正确可靠的;除此之外,该神经网络预测还适用于破膜前初始压力的情况。

## 5 结论

通过分析不同瞬态卸压工况下破膜前初始压力  $p_{\max}$  与最大降压速率  $|\partial p / \partial t|_{\max}$  对应的底排药剂燃烧状态,发现燃烧状态与这两个参数之间的关系是线性可分或近似线性可分的;建立与之相适应的单层与二层感知器神经网络模型,得到了燃烧状态类别界定判据,并据此可预测其它瞬态卸压工况下底排药剂的燃烧状态;通过随机抽样模拟,验证了所建立感知器神经网络模型的正确性与可靠性。

### 参考文献:

- [1] 郭锡福. 底部排气弹外弹道[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. GUO Xi-fu. Exterior Ballistics of Base Bleed Projectile [M]. Beijing: Publishing House of Defense Industry, 1995.
- [2] 陆春义, 周彦煌, 余永刚. 高压降速率下复合底排药剂瞬变燃烧特性研究[J]. 含能材料, 2007, 15(6): 587-591. LU Chun-yi, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang. Combustion of composite base bleed charge under rapid depressurization [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2007, 15(6): 587-591.
- [3] 陆春义, 周彦煌, 余永刚, 等. 底排装置低频振荡燃烧和永久熄灭[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(1): 112-116. LU Chun-yi, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang, et al. Low frequency oscillation combustion and extinguishment of base bleed unit [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2009, 33(1): 112-116.
- [4] 周开利, 康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. ZHOU Kai-li, KANG Yao-hong. Neurons Network Model and Programming Design of MATLAB Simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [5] 葛哲学, 孙志强. 神经网络理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007. GE Zhe-xue, SUN Zhi-qiang. Theory of Neurons Network and Realizing by MATLAB R2007 [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.

## Prediction Model for Combustion State of Base Bleed Propellant Based on Perceptron Simulation

ZHANG Ling-ke, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang, ZHAO Wei

(College of Power Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The previous investigation shows that the combustion behavior of base bleed propellant is classified to three states under the condition of transient depressurization, which are re-ignition, low frequency oscillation combustion and extinguishment, respectively. Variant combustion state was determined mainly by the maximum pressure before transient depressurization (20–90 MPa) and the maximum depressurization velocity ( $1.2 \times 10^3 - 6 \times 10^3 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) during whole process. The relationship of combustion state between the maximum pressure before transient depressurization and the maximum depressurization velocity is linear separable pattern approximately. Two kinds of perceptron models, single layer and double layers, were constructed according to artificial neural networks. Both of the two perceptron models were trained by using test data. The decision boundary of combustion states of base bleed propellant was obtained, which included both the maximum pressure before transient depressurization and the maximum depressurization velocity factors. The correction and reliability of the perceptron were validated by Monte-Carlo random sampling. The perceptrons could be used to predict the combustion behavior of base bleed propellant under the case of transient depressurization, and it was useful to improve design of base bleed unit.

**Key words:** armament launching theory and technology; combustion state; base bleed propellant; perceptron simulation; classified criterion

**CLC number:** TJ5; TJ413<sup>+</sup>.5

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.012



## 第 25 届国际弹道会议概况

第 25 届国际弹道会议于 2010 年 5 月 17–21 日在北京召开。此届会议首次由我国举办,也是首次在亚洲地区举办。会议由中国兵工学会和南京理工大学主办。国际弹道会议是国际常规兵器领域层次最高、信息量最大、最具影响力的学术盛会之一,本次会议参加者主要来自于美国、俄罗斯、法国、德国、英国、印度、意大利、加拿大、澳大利亚、韩国、波兰、瑞典、以色列、比利时、西班牙、巴基斯坦、土耳其、挪威、南非和中国等二十余个国家。大会报告 60 篇,张贴报告近 160 余篇。

会议内容涉及内弹道、外弹道、终点弹道、发射动力学、战斗部机理和设计、创伤弹道、装甲防护、测试技术和爆炸力学等方面。南京理工大学教授、大会执行主席王中原全面介绍了中国在常规兵器、弹道力学和战斗部设计等方面的研究进展和取得的成绩,并展望了未来的发展方向。法国的 R. Cayzac、德国的 Lips Hendrik、俄罗斯的 Vladislav A. Veldanov 和美国的 LaMar Thompson 分别阐述了国际社会在外弹道、弹道力学、终点弹道等研究领域的成果,代表了当前的最高研究水平。美国学者 Thelma G. Manning 等在内弹道研究领域、挪威学者 Jo H Kiran 等在外弹道研究领域、美国学者 J. A. Cordes 等在发射动力学研究领域、美国学者 LaMar Thompson 等在弹道力学研究领域、加拿大华裔学者 Ming Cheng 等在装甲防护研究领域均给出了精彩的报告。

第 26 届国际弹道会议将于明年在美国迈阿密召开。

(中国工程物理研究院化工材料研究所 韩勇供稿)