

基于人工神经网络的燃速相关性研究^{*}

刘佩进, 吕 翔, 何国强

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 采用基于误差反向传播算法 (BP 算法) 的人工神经网络技术, 通过一维模型的分析计算, 表明了该方法应用于燃速相关性研究是可行的, 且具有更好的稳定性; 初步建立了燃速相关性二维模型, 考虑了发动机尺寸效应对燃速的影响, 并利用试验数据进行了验证, 结果表明二维模型有较高的燃速预示精度。可以利用该方法开展燃速相关性分析。

关键词: 固体推进剂; 推进剂燃速; 相关特性; 尺度效应; 人工神经网络

中图分类号: V435.12 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 02-0156-03

Burning rate relativity investigation using artificial neural network

LIU Pei jin, LÜ Xiang, HE Guo qiang

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: Artificial Neural Network (ANN) theory using BP arithmetic was used to investigate the burning rate relativity of solid propellant. The result of 1D model proved the feasibility and stability of this method. A two-dimension model was also established. Experimental data was adopted to verify the model. The calculating results indicate the precision of predicted burning rate is higher than the 1D model. This method can be used to calculate the burning rate relativity of solid propellant.

Key words: Solid propellant; Propellant burning rate; Scale effect; Correlation property; Artificial neural network

1 引 言

固体推进剂燃速是影响发动机内弹道性能的重要参数之一, 目前常用燃速仪法、标准发动机法和全尺寸发动机法测得。这三种方法测得的燃速是有差异的, 有必要建立不同试验方法之间的燃速相关性模型, 以达到利用燃速仪或标准发动机测得的燃速预示全尺寸发动机燃速的目的。燃速相关性研究的主要方法有统计回归分析相关法、理论模型相关法、热辐射作用相关法和性能预示相关法^[1~3]。这些方法存在需要样本数据大和预示精度差的缺点。

人工神经网络是将大量的简单神经元广泛互连成一种复杂的计算结构, 具有学习、记忆、计算和各种智能处理功能, 在解决非线性映射问题中发挥了很大的作用^[4], 一些学者开始应用神经网络方法解决燃烧领域的问题^[5,6]。本文则利用基于 BP 算法的人工神经网络建立燃速相关性模型, 以提高燃速的预示精度。

2 研究方法与结果

固体推进剂的燃速相关性研究是寻求在众多影响因素下, 由标准发动机(或燃速仪)燃速到全尺寸发动机燃速的非线性映射关系

$$r = f(r_0, x_1, x_2, \dots, x_n)$$

式中 r 为全尺寸发动机燃速, r_0 为试验发动机燃速, x_i 为各种影响因素的度量。从燃烧理论上建立这种复杂的非线性映射关系是很困难的, 而神经网络在建立非线性映射关系上具有优势, 可以考虑将燃速与诸因素之间的复杂关系用神经网络来描述。

Hecht-Nielsen 曾分析了多层神经网络实现非线性映射的能力, 并指出对任一给定的函数 f , 总存在一个三层 BP 网络可以无限逼近它。本文正是基于这种考虑, 采用三层 BP 网络进行燃速相关性研究, 不考虑具体的燃烧过程。图 1 是在燃速相关性研究中采用的典型 BP 网络结构。

^{*} 收稿日期: 2003-05-07; 修订日期: 2003-06-03。

作者简介: 刘佩进 (1971—), 男, 讲师, 博士, 研究领域为火箭发动机及燃烧。E-mail: liupg@nwpu.edu.cn

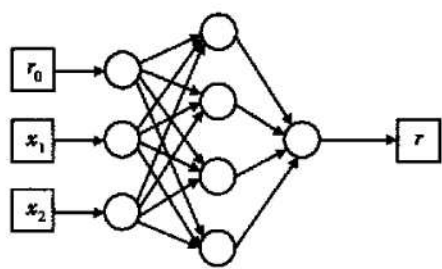


Fig. 1 Neural network structure in burning rate relativity analysis

2.1 一维模型

当由一种固定的标准发动机(BSF)预示某一种确定的全尺寸发动机的燃速时,可以通过一维模型 $r=f(r_0)$ 描述标准发动机和全尺寸发动机基础燃速之间的一对一映射关系。这里所谓的基础燃速是指不考虑诸如推进剂初温和侵蚀燃烧等其它因素对燃速的影响,因为这些影响可以通过已有的经验公式确定,在神经网络分析中不予考虑。通过和已有的燃速相关性分析结果相比较,可以验证利用神经网络进行燃速相关性研究的可行性。一维模型采用的BP网络结构图如图2所示,中间隐层的节点数需要根据学习样本数据来确定。

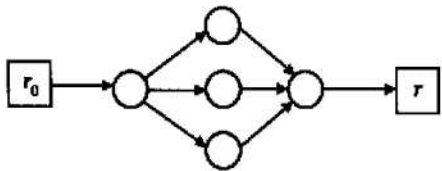


Fig. 2 One dimension model for burning rate relativity analysis

利用文献[2]提供的实验数据,用一维模型进行了燃速相关性计算(不包括第10个点),计算结果见表1。表中燃速的单位为mm/s, S_r 为剩余均方差。可

以看出:一维神经网络模型的计算结果同线性回归结果之间的相差不大,剩余均方差较小,表明可以应用该方法进行燃速相关性研究。

在网络的训练过程中,表1中的第10点对结果的影响较大;从图3的实验数据散点分布也可看出,第10点为明显的异常点。图3中的曲线分别为考虑和不考虑此异常点的神经网络(图中的Net10和Net9)和线性回归计算结果,考虑异常点的线性回归计算结果(Line10)与不考虑异常点的线性回归结果(Line9)差别较大,而神经网络方法考虑和不考虑异常点的处理结果差别很小,表明神经网络模型比线性回归模型更稳定,因此更具有工程应用价值。

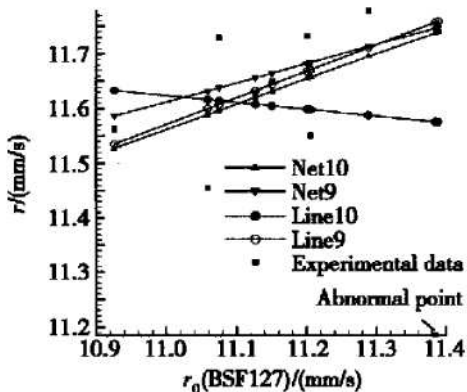


Fig. 3 Comparison between 1D ANN model and linear regression

2.2 二维模型

实际上,标准发动机燃速和全尺寸发动机燃速的相关受诸多因素的影响,不能用简单的一维模型来描述,需要用复杂的二维模型来解决。在这些因素中,初温、平行于燃烧表面的燃气流动和加速度等都有其自身的规律。在本文的研究中,相关性问题的关键归结到发动机的尺寸效应,即发动机和装药的结构尺寸

Table 1 Calculating result of 1D ANN model and linear regression

No.	r_0 (BSF Φ127)/ (mm/s)	r /(mm/s)	Result of ANN/(mm/s)	Relative error/%	Result of linear regression/(mm/s)	Relative error/%
1	10.926	11.563	11.587	0.20	11.536	0.24
2	11.289	11.779	11.714	0.55	11.711	0.58
3	11.389	11.743	11.748	0.04	11.760	0.14
4	11.201	11.732	11.683	0.42	11.669	0.54
5	11.151	11.65	11.665	0.13	11.644	0.05
6	11.127	11.627	11.656	0.25	11.633	0.05
7	11.206	11.551	11.684	1.15	11.671	1.04
8	11.075	11.73	11.638	0.79	11.608	1.04
9	11.059	11.455	11.632	1.55	11.600	1.26
10	11.385	11.184	$S_r = 0.097$		$S_r = 0.093$	

差异引起热环境的变化导致的燃速差异。因此应将包括燃烧室的直径和自由容积,装药的形状尺寸等在内的各个结构尺寸作为二维模型的输入。但是这样将增加模型的复杂度,同时无法体现出尺寸效应的关键所在,所以有必要弄清楚尺寸效应的机理并找到合理有效的度量方法。

尺寸效应主要是发动机和装药的结构尺寸影响燃气对燃面的热反馈,燃气的当量辐射长度 L 在燃气对燃面的热反馈中起着决定性作用。因此可以用 L 来度量发动机的尺寸效应, L 的定义如下^[7]:

$$L = 4C(V/A)$$

其中 V 为自由容积, A 为燃面面积, C 是一个修正系数。考虑到 C 的选取有一定难度,以及在利用 BP 网络进行计算时将对输入数据进行归一化处理,比例系数对计算结果没有实质性影响,因此采用如下的尺寸作为发动机特征尺寸用以表征发动机的尺寸效应:

$$L = V_0/A_b$$

公式中 V_0 为燃烧室的初始自由容积, A_b 为燃面面积。对端面燃烧的装药来说, L 等于燃气层在轴向的厚度;对于内孔燃烧的装药来说, $4L$ 等于内孔直径,特征尺寸 L 有效地度量了燃气对燃面的热辐射。引入特征尺寸后,考虑到发动机的尺寸效应,燃速相关性的二维神经网络模型变为:

$$r(L_2) = f(r_0, L_1)$$

其中 L_1 为标准发动机的特征尺寸, L_2 为全尺寸发动机的特征尺寸。模型采用的 BP 网络结构如图 4 所示,中间隐层的节点数待定。

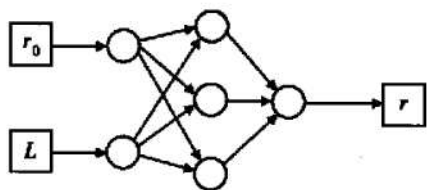


Fig. 4 Two dimension model for burning rate relativity analysis

如果想通过缩比发动机预测不同几何尺度的全尺寸发动机的燃速,则需要建立更复杂的模型。网络训练稳定之后,可以进行单因素对推进剂燃速的影响分析。

用一维模型(不考虑特征尺寸)和二维模型对一组某研究所提供的复合推进剂燃速的试验数据进行了燃速相关性计算,其中特征尺寸是假定值,计算结果如表2所示,一维模型的结果仅列出了相对误差。

计算结果表明,一维模型结果的相对误差平均为 1%;二维模型结果的相对误差平均为 0.2%,最大不超过 0.4%。模型稳定性分析表明,二维模型的结果稳定,不受样本数的影响。这说明二维模型比较适合于工程实际应用。

Table 2 Calculating result of 2D ANN model

No.	L	$r_0/$ (mm/s)	$r/$ (mm/s)	2D model result/(mm/s)	Relative error of 2D model/%	Relative error of 1D model/%
1	0.335	11.470	11.568	11.589	0.18	0.72
2	0.366	11.314	11.566	11.523	0.38	0.18
3	0.403	11.367	11.748	11.733	0.12	1.17
4	0.395	11.229	11.505	11.535	0.25	0.38
5	0.389	11.273	11.546	11.564	0.16	0.70
6	0.384	11.303	11.574	11.582	0.07	0.08

3 结 论

(1) 本文提出的一种基于人工神经网络计算固体推进剂燃速相关性的方法,其非线性映射能力的优势与推进剂燃速相关性问题的物理本质更为接近,更适合于开展燃速相关性分析。(2) 计算结果表明,本文的模型具有较高的精度和更好的稳定性。(3) 由于同一种推进剂在不同尺寸的发动机中的试验数据比较缺乏,因此本模型还有待于进一步的试验数据验证。

参考文献:

- [1] 殷金其,陈步学,王克秀,等. 固体火箭发动机燃速相关性研究评述[J]. 固体火箭技术, 1990, 13(1).
- [2] 唐承志,丁汝昆. 固体发动机推进剂燃速预估研究[J]. 固体火箭技术, 1996, 19(4).
- [3] 任国周. 固体火箭发动机燃速相关性研究[J]. 推进技术, 1989, 10(3).
- [4] 程相君,王春宁,陈生潭. 神经网络原理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [5] 邓鹏图,田德余,庄逢辰. 复合固体推进剂燃烧性能模拟计算的神经网络方法[J]. 推进技术, 1996, 17(4). (DENG Peng-tu, TIAN De-yu, ZHUANG Feng-chen. A neural network for modeling calculations for composite propellants [J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(4).)
- [6] 陈小钱,王振国,谭建国,等. 固体燃料冲压发动机燃速的人工神经网络辨识[J]. 航空动力学报, 2001, 16(1).
- [7] 周为民,阮崇智,赵锡良,等. 复合固体推进剂燃速相关性[A]. 中国宇航学会固体火箭推进专业委员会 1990 年学术交流论文集[C], 1990.

(编辑: 梅 瑛)