

## 神经网络在行波管设计中的应用

刘 韦<sup>\*\*\*</sup> 李 实<sup>\*</sup> 阴和俊<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>(中国科学院电子学研究所微波器件中心 北京 100080)

<sup>\*\*</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘 要:** 该文介绍了使用 MATLAB 神经网络模拟已有的经验数据的方法,并将其应用于行波管的设计中。与传统的根据经验值二次插值的结果相比较,用神经网络的方法拟合的结果更加接近实验模拟的色散特性。

**关键词:** 行波管, MATLAB, 神经网络

**中图分类号:** TN124      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-5896(2005)07-1174-03

## Application of Neural Network to Design of TWT

Liu Wei<sup>\*\*\*</sup> Li Shi<sup>\*</sup> Yin He-jun<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>\*\*</sup>(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** In this paper, the method of neural network in the computer code MATLAB is used to simulate experimental data, which is applied to the design of traveling-wave tube. Compared with the conventional method of quadratic interpolation, it is a practical method that the simulation result with the neural network is closer to the characteristics of dispersion in the test.

**Key words** Traveling-Wave Tube (TWT), Neural network, MATLAB

### 1 引言

行波管是一种具有强大生命力的微波电子器件。人们从原理、结构、工艺和材料等各方面进行了大量的工作。其中有很多的成功创造,提出了不少新的作用原理,但是也有很多工作尚有待于实验和理论工作的进一步深入。在多年的工作中,从事微波管科研工作人员总结了大量的实际工作经验,从而在这个基础上开展新的设计工作。由于行波管的复杂性,很多数据都无法得出精确的解析解,但是长期的工作为我们总结出了丰富的经验数据。在新的设计工作中如何合理地应用这些已有工作经验就是现在科技工作者需要做的一项重要工作。文献[1]就集中了以往很多的设计中的宝贵经验。实际中的螺旋线行波管,一般都有介质夹持杆及金属屏蔽筒。它们对色散特性的影响比较大。一般来说介质负载加重,屏蔽筒接近螺旋线,均使相速变慢,并使色散特性变得更为平坦。因此在设计行波管中有效地利用这一特性改善色散曲线是很重要的。如何选择合适的屏蔽筒半径与螺旋线半径之比,从而得到平坦的色散特性和较佳的耦合阻抗就是所需要研究的问题。在文献[1,2]中有很多关于屏蔽筒半径和螺旋线半径之比( $R/a$ )的设计表格(见表 1),但是只列举出了有限的一些数据,常规的设计中,由于繁琐的查询方法使得人

们大多采用插值的方法来获得所需要的数据,由于数据的误差导致最终结果有较大误差。

人工神经网络(ANN)是近几年来发展起来的一门新兴学科,它可以处理那些难以用数学模型描述的系统,可以逼近任何非线性的特性,具有很强的自适应、自学习能力,因此倍受瞩目。有关神经网络的理论及应用日趋成熟,相继提出了多种神经网络模型,包括误差反传播的前馈神经网络模型(BP 网络),Hopfield 网络,自适应共振理论(ART)等。其中,应用最为广泛,且目前研究最为深入的,当属 BP 网络。这里采用在 MATLAB 中误差反传训练算法(BP 算法)神经网络的方法来模拟经验数据表格得到的数据与二次插值的方法得到的数据相比较,最后根据 MAFIA<sup>[3]</sup>模拟计算色散特性,从而证明神经网络的方法模拟结果误差更小,这样就可以更好地利用以往的经验值,在行波管设计中得到更广泛的应用。

表 1 对三圆杆夹持情况计算的介质负载因子 DLF 和屏蔽筒负载因子 SLF ( $\epsilon_r=3.8$ )

$\gamma\alpha$	$R/a=1.6$		$R/a=1.8$		$R/a=2.0$	
	DLF	SLF	DLF	SLF	DLF	SLF
0.2	0.656	0.64425	0.616	0.67530	0.586	0.70282
0.3	0.661	0.70779	0.621	0.74047	0.592	0.76904

## 2 理论分析及神经网络调试方法

人工神经网络技术，是一种不需要选取基函数系的非线性函数逼近方法，具有自学习、自组织和自适应、固有的并行结构和并行处理、知识的分布存储、容错性等功能和特点，在复杂系统的建模问题上表现出了它的优越性。神经网络与经典计算方法相比并非优越，只有当常规方法无法解决或效果不佳时神经网络才能显示出其优越性。尤其是当对问题的机理等规律不甚了解，又不能用数学模型表示的系统，神经网络是解决问题很有力的工具。另一方面，神经网络对需要处理大量原始数据而不能用规则或公式描述的问题，表现出极大的灵活性和自适应性，因此在生物、商业、环境、金融、制造业、医学、军事、通信等方面已经获得广泛应用。神经网络的实现方案可分为基于传统计算机技术(包括：软件模拟、并行处理器阵列、传统计算机的加强等)和基于直接硬件实现(包括：VLSI 技术、光学等)，但目前最常用的方法还是软件模拟。由于这需要掌握计算机编程语言和较高的编程技巧，因此不利于神经网络技术的推广和应用，所以国际上许多公司和研究单位设计了通用的 ANN 模型库，MATLAB 环境下的神经网络工具箱就是其重要代表。通过使用工具箱可以简化设计者的编程工作，有时间思考和研究更有效的神经网络应用成果。

### 2.1 理论分析

考虑介质杆和屏蔽筒时，螺旋线色散特性可以按下式计算：

$$\left(\frac{k\alpha}{\gamma\alpha}\right)^2 \text{ctg}^2 \psi = S(\gamma\alpha)(\text{DLF})^2(\text{SLF})^2 \approx \left(\frac{v_p}{c}\right)^2 \text{ctg}^2 \psi \quad (1)$$

其中

$$\gamma\alpha = \frac{\omega}{v_p} \times a = \frac{2\pi a^2}{c \times p} \omega \quad (2)$$

在很多情况下，螺旋线上慢波系数很小这时有  $\gamma^2 = \beta^2 - k^2 \approx \beta^2$ ，所以在工程中  $\gamma\alpha$  作简化处理得到式(2)。因为二次插值和神经网络采用同样的  $\gamma\alpha$  所以可以忽略其中的误差。根据已知的成熟管型某螺旋线行波管的数据(表 2)为例，先计算出  $\gamma\alpha$  值，通过已有的经验数据分别采用插值和神经网络的方法得到  $S(\gamma\alpha)$ 、DLF 和 SLF 的数据就可以得到行波管的色散特性曲线，并与利用已知的 MAFIA 模拟计算方法得到的色散特性<sup>[4]</sup>相比较(可参看图 3)。

### 2.2 神经网络调试方法

设需要训练和仿真的前馈网络函数构造如图 1 所示。

表 2 某螺旋线行波管尺寸数据 (单位: mm)

螺旋线结构尺寸				夹持杆结构尺寸			管壳尺寸
平均半径	厚度	宽度	螺距	形状	半径	介电常数	内径
1.766	0.21	0.27	1.98	圆杆	0.53	3.0	5.82

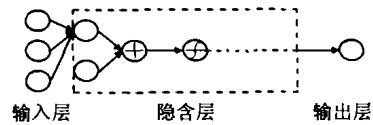


图 1 函数构造示意图

网络采用 BP 算法。BP 算法是有指导的训练<sup>[5]</sup>，是靠调节各层的权值使网络学会训练样本所表达的规律。需要注意的是：MATLAB 下的神经网络工具箱不必专门指出输入层神经元和输出层神经元的多少，而是自动地从学习函数和训练函数中辨认。所以学习函数和训练函数的给定就显得特别重要。在 MATLAB 神经网络工具箱中，有很方便的构建神经网络的函数。对于 BP 网络的实现，MATLAB 神经网络工具箱提供了 4 个基本函数：newff, init, train 和 sim，它们分别对应 4 个基本步骤，即新建、初始化、训练和仿真。

经过多次实验比较本文采用了建立只有 1 个隐含层的 BP 网络<sup>[6]</sup>，来逼近一个函数，其隐含层的神经元个数为 5。隐含层和输出层的转移函数分别为双曲正切 S 函数和线性函数，训练函数为 train。输入向量分别为  $\gamma\alpha$ ， $\epsilon_r$ ， $R/a$ 。输出的目标向量分别为  $S(\gamma\alpha)$ 、三圆柱夹持杆的介质负载因子 DLF 和屏蔽筒负载因子 SLF。设计方法如下。

建立网络：`net=newff(minmax(P),[5,1],{'tansig','purelin'},'traingdx');`

初始化：采用默认的初始化参数对网络进行初始化，即 `net=init(net);`

网络的训练以及训练函数的参数设置如下：

```
net.trainParam.show=10      %训练过程中显示频率
net.trainParam.epochs=3000  %训练过程的最大步骤
net.trainParam.goal=0.0001  %训练期望目标
net.trainParam.lr=0.001     %训练学习率
```

其中  $P$  为输入向量。训练中可以设置训练步骤和学习率，一般说来学习率越低学习结果越好，但是过低的学习率会增加学习时间，这里采用学习率为 0.001。用文本编辑器建立一个  $M$  文件。将输入向量用列表形式存放在  $M$  文件中。通过已有的 DLF 和 SLF 数据与模拟结果相比较，修正误差继续运算比较。使用奔腾 4，内存 512M 的计算机，输入 400 组数据大概 12 个小时重复训练调节即可得到所需要的神经网络。

## 3 分析与结果

图 2 是分别利用神经网络和二次曲线拟合的方法对  $S$  色散参数模拟，圆连线是二次曲线模拟的结果，矩形点连线为神经网络模拟结果。由于  $S(\gamma\alpha)$  属于单值输入输出，可以看出神经网络的方法比二次拟合的方法更接近实际曲线值。图 3 是分别拟合了  $S$  参数，介质负载因子 DLF 和屏蔽筒负载因子 SLF 参数后，根据式(1)推导出螺旋线行波管的色

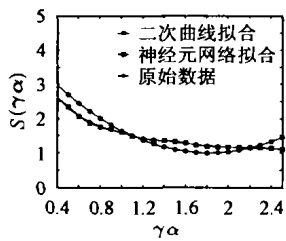
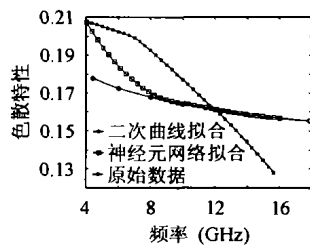
图2 对  $S(\gamma\alpha)$  拟合

图3 对色散曲线的拟合

散特性。MAFIA 用于模拟计算高频慢波电路的结果与实验测试值非常接近,这已为国内外同行所证实<sup>[7,8]</sup>,所以这里用 MAFIA 模拟的结果作为参考数据。

可以看出,在工作频段,神经网络模拟的方法与二次插值方法得到的数据相比更加接近 MAFIA 模拟值,误差在 6% 以内,也就是更加接近真实情况。这里决定介质负载因子 DLF 和屏蔽筒负载因子 SLF 影响有 3 个输入因子,简单的二次插值拟合使得误差累计。增加训练的数量和次数可以使得神经网络模拟的结果更加接近精确值;这是后续的工作。由于神经网络不是简单的线性模拟已有的经验值,而是经过多次训练修正接近了经验值,所以比简单的二次插值的方法更加有助于我们改进设计方案。而且对于已经训练好的神经网络来说,重复操作时,只需要输入  $\gamma\alpha$ ,  $\epsilon_r$ ,  $R/a$  参量,很快就可以得到相应的输出因子,而且对于不断更新的数据可以利用训练函数进行训练修正。因此对于行波管的增益、效率、带宽甚至相位要求越来越高的现代设计理论来说,神经网络是非常必要的一种方法。

#### 4 结束语

通过从以往经验值得到的数据入手,经过神经网络模拟得到一个新的数据关系库。由于这种神经网络的实现是通过对大量已有的经验数据训练和模拟得到的,在手册可查询范围内的数据可以用模拟出的神经网络得到相对精确

的解,对于手册查寻范围以外的数据也可以通过神经网络的方法得到精确的解,有了合适的神经网络可以快速、合理地使用以往的经验值,从而减少实验的次数,简化设计周期,同时也使设计有了针对性。模拟的结果证明这种方法是可行的,也是可靠的。

#### 参考文献

- [1] 电子管设计手册编辑委员会,中小功率行波管设计手册(内部资料):120-129.
- [2] Pierce J R. Traveling Wave Tubes[M]. Princeton NJ: Van Nostrand, 1950, 173: 193.
- [3] The MAFIA Collaboration. MAFIA User Manual version4, 105[M]. Germany : CST Inc, 2001.
- [4] 雷文强等.螺旋慢波电路高频特性的三维计算模拟.强激光与粒子束,2002,14(6):892-895.
- [5] 闻新等. MATLAB 神经网络应用设计.北京:科学出版社,2002:207-244.
- [6] 陈杨等. Matlab6.0 版本中神经网络工具箱训练算法的使用与比较.电脑与信息技术,2002,3,1-6.
- [7] 王劲松.用 MAFIA 软件对行波管慢波电路冷测特性的模拟与应用.[硕士学位论文],北京真空电子技术研究所,2001.1:9-14.
- [8] 张国兴等. MAFIA 软件模拟三维耦合腔慢波结构.电子学报,1997,25(6):1-5.

- 刘 韦: 男,1976 年生,博士生,从事电磁场理论与大功率微波器件的计算机模拟仿真研究.
- 李 实: 男,1963 年生,博士,副研究员,主要从事大功率微波器件仿真和研制工作.
- 阴和俊: 男,1963 年生,博士,研究员,长期从事电磁场理论与大功率微波器件的研究工作.