

# 电大尺寸矩形谐振腔耦合场的神经网络预测

刘伟娜, 詹华伟

(河南师范大学 电子与电气工程学院;电磁波特征信息探测河南省高等学校重点学科开放实验室,河南 新乡 453007)

**摘要:**以电大尺寸的矩形谐振腔局部点的前后门耦合场的计算,通过神经网络方法实现其他点耦合场的预测,判定矩形谐振腔的电磁敏感点.由于电大尺寸的矩形腔很难通过全波分析或小波分析获得特定条件下的耦合场,而神经网络方法不需考虑内部模型的复杂性便可实现非线性预测,因此将人工神经网络方法应用于电磁预测中可实现矩形腔耦合场的计算.通过电大尺寸矩形腔前后门耦合场实验方案,提取了目标参数,创建了BP神经网络的预测模型.即在平面波照射下,以入射波的功率,极化方向,预测点的位置坐标作为BP网络的输入参数,相应点的功率(电压)作为输出参数,经过适当的训练,建立耦合场的预测模型,并以此模型预测了腔体内探测点的耦合场.预测结果与实测结果相比较显示了该方法的有效性和准确性,为电大金属腔耦合场的计算提供了一种有效的方法.

**关键词:**矩形腔;电大尺寸;BP神经网络;电磁兼容;预测

**中图分类号:**TN015

**文献标志码:**A

在电磁兼容领域,预测金属腔内耦合场,判定电磁敏感点是非常重要的一个问题<sup>[1]</sup>.现代的电子电气设备都具备金属外壳,这些外壳的主要作用是一方面屏蔽自身产生的辐射,另一方面是屏蔽外界的电磁干扰,然而在实际的电子电气设备上都不可避免地不同面上开有各种缝隙<sup>[2]</sup>.因此,研究矩形腔的耦合场对于电磁兼容分析及电磁效应评估具有重要意义.同时,通过分析计算并了解矩形腔内的电磁场分布,可以在电子电气设计时使其内部电路与器件布局更为合理<sup>[3]</sup>.

所谓前门耦合指的是能量通过天线、传输线等耦合到系统内;后门耦合即孔缝耦合是指能量通过缝隙或孔洞耦合到系统内<sup>[4]</sup>.前门耦合属于强耦合,其产生的感应电流可直接破坏前端电子设备,在电子电路设计中一般要采取相应的防护措施.后门耦合是多通道的,产生的场分布在整个系统内部.在电磁兼容领域,后门耦合的研究方法一般有:通过简化边界条件,求麦克斯韦方程组来分析腔内耦合场的分布,但这种方法一般只能解决极少数的特殊问题,应用范围非常有限;另一方法是数值方法,包括时域有限差分,矩量法,有限元等,这些方法在分析研究中得到了广泛的应用,并取得了不错的结果<sup>[5-8]</sup>,但很少用来分析前门耦合.近年来,神经网络得到了极大的关注,并被成功应用于电磁兼容领域<sup>[9]</sup>.对于电大尺寸的金属谐振腔带来的巨大的计算代价,数值分析方法求解非常复杂,而神经网络方法<sup>[10-12]</sup>不必考虑问题模型的复杂性便可实现输入输出数据之间的非线性映射.因此本文采用神经网络方法对电大金属腔前后门耦合场<sup>[13]</sup>的问题进行求解.通过电大矩形腔前后门实验方案,提取了目标参数,创建了BP神经网络的预测模型,经过适当的训练,对电大金属腔的耦合场进行了预测.

## 1 电大矩形腔前后门耦合问题描述

图1描述了电大矩形腔前后门耦合的实验系统.腔的前表面带有孔缝,其规格为 $t \times s = 12.5 \text{ cm} \times 11 \text{ cm}$ .腔

收稿日期:2016-06-26;修回日期:2016-09-14.

基金项目:河南省科技攻关项目(162102210263);河南师范大学青年基金(5101029279083);河南省高等学校重点科研项目(17B510003;17B510004).

第1作者简介:刘伟娜(1979-),女,河南汝州人,河南师范大学讲师,博士,研究方向为微波技术,E-mail:ln168168@sina.com.

通信作者:詹华伟(1979-),男,河南汝南人,河南师范大学副教授,研究方向为高频电子线路,E-mail:zhanhw@126.com.

上表面有接收天线(矩形喇叭天线),腔壁由 PEC(perfect electrical conductivity,理想导体)组成,其规格为  $a \times b \times c = 50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ ,坐标原点的选择如图 1 所示,腔的上表面有 6 个测量探针,编号为探针 1~6.入射波的电场方向标记为  $\theta$ .实验过程中,将不同功率、不同极化方向的平面波照射到矩形腔,能量将通过接收天线和孔缝耦合到腔内.运用腔上少数的测量点的耦合场,通过 BP 神经网络方法预测腔内任一点的耦合场.6 个探测点坐标点位置如表 1 所示.

## 2 电大金属腔耦合场神经网络预测模型

本文中电大尺寸金属腔耦合场是一个以入射波电场方向,入射波电场,入射波与腔的距离及腔内预测点的位置为输入量,特定点的电压为输出量,同时各部分之间存在相互耦合的系统.利用电大尺寸金属腔的动态输入输出不断训练完善 BP 神经网络的预测模型[9],直至达到规定的误差精度.在 BP 网络中选择含有一个隐含层模型,则输出层的输出

$$O_v = F_{\text{ann}}(E_i, \theta, f, l, r), \quad (1)$$

其中,  $E$  是入射波的电场强度,  $\theta$  是入射波电场的方向,  $f$  是入射波的频率,  $l$  是入射波照射到孔缝的直线距离,  $r$  是测量(或预测)点的位置坐标,  $F_{\text{ann}}$  代表 BP 神经网络模型的非线性连接.实验过程中,入射波频率为 2.45 GHz,  $l$  为 2 m 保持不变,因此影响电大金属腔耦合场模型的输入参数为 3 个,分别是:入射波电场强度(功率)、入射波电场方向及探测点的位置坐标;输出参数只有一个即给定点的耦合场.网络训练及预测的步骤如图 2 所示.

表 1 6 个探测点的位置坐标 (cm)

坐标	探针 1	探针 2	探针 3	探针 4	探针 5	探针 6
$x$	-10.32	-10.95	-10.83	-89.5	-91.2	-89.6
$y$	96.50	97.20	96.44	96.00	96.71	97.23
$z$	33.30	22.05	10.80	32.00	21.20	10.60

训练需要的样本由实验测得,所有样本数据都需归一化,其归一化关系式

$$\bar{x} = x_{\min} + \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}(x_{\max} - x_{\min}), \quad (2)$$

其中,  $(x_{\min}, x_{\max})$  是输入数据的范围,本文取  $(0, 1)$ .目前, BP 神经网络常用的算法包括:标准 BP 算法,附加动量法, L-M 算法等,其中 L-M 算法在收敛速度、网络泛化、避免陷入局部极小值等方面具有明显的优势<sup>[17]</sup>.因此本文选取 L-M 算法训练网络,当网络输出与实际输出之间的误差达到规定值时,训练结束.经过训练后的 BP 网络将具备精准的预测能力.

## 3 实验结果及分析

整个装置系统如图 3 所示.两个矩形喇叭天线的中心频率与功率源的工作频率都是 2.45 GHz.实验测试时,功率源与发射天线相连,能量通过接收天线和孔缝耦合到矩形腔中,6 个探测点的功率由频谱仪测得.实验测试在微波暗室中完成.探测点的功率记为  $P_0$ ,其电压  $V = \sqrt{P_0 Z_0}$ ,其中  $Z_0 = 50 \Omega$  为 N 型接头的特性阻抗.

训练样本是在改变  $\theta$  及  $P_i$  的情况下获得的.具体方法是在  $0^\circ \sim 180^\circ$  的范围内改变  $\theta$  角,步长取  $\Delta\theta = 10^\circ$ ,可得到 19 组数据.同时在  $1 \sim 30 \text{ W}$  的入射波功率范围内改变  $P_i$ ,步长取  $\Delta P_i = 3 \text{ W}$ ,可获得 11 组数据,

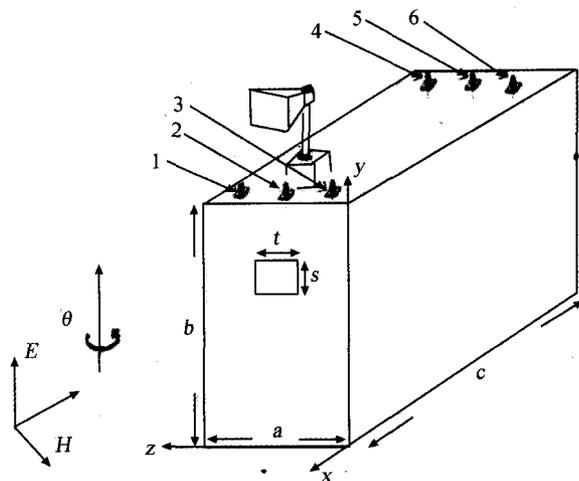


图1 带有接收天线的电大矩形金属腔

因此共可得到  $19 \times 11$  组训练样本. 测试样本是在保证  $P_i = 1 \text{ W}$  不变的情况下, 只改变  $\theta$ , 变化范围为  $30^\circ \sim 180^\circ$ , 步长取  $\Delta\theta = 15^\circ$ , 共获得 11 组样本. 神经网络模型训练样本选择 1~5 号探针测得的数据, 测试样本选择第 6 号探针的测试数据.

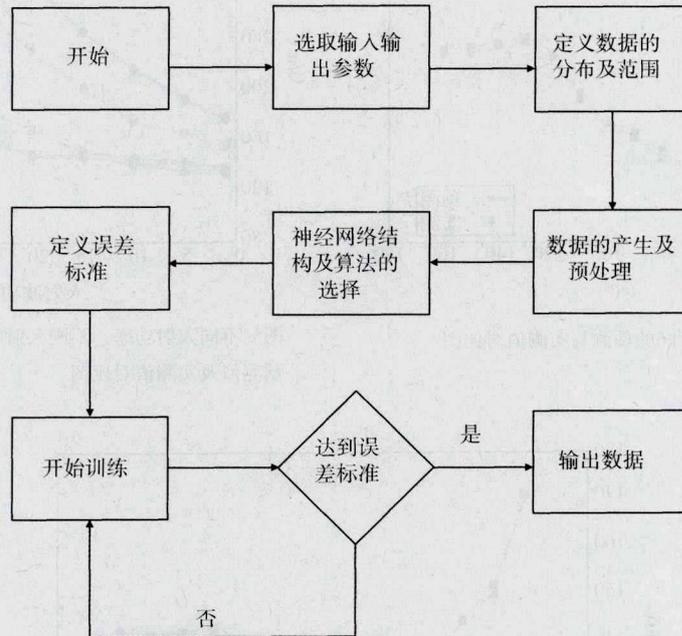


图2 BP神经网络训练及预测步骤

将实验所得的样本数据归一化处理后, 调用 MATLAB 神经网络工具箱中的 Newff 函数对网络进行初始化. 网络模型参数为: 训练步数为 60 000, 网络性能误差为 0.001, 学习率为 0.02, 动量常数为 0.9, 最后调用 L-M 算法训练. 当训练过程达到任意一个设定的参数时自动停止训练. 3 层 BP 神经网络的隐含层神经元个数  $m = 12$  时, 网络达到最优状态, 此时的神经网络达到最佳预测功能. 如图 4 所示显示了 2.45 GHz 平面波照射下, 电大尺寸谐振腔第 6 个测试样点处的预测电压及测试值. 由图 4 可知, 预测结果与实验测试结果吻合的很好.

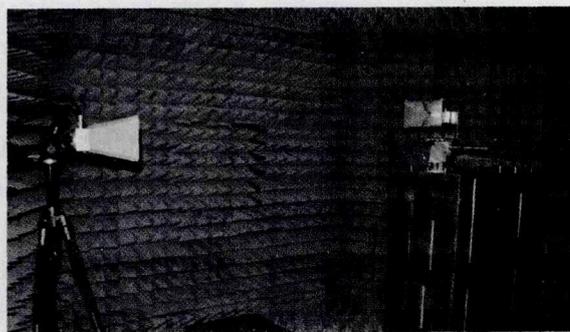


图3 金属腔耦合场模型

运用训练好的神经网络, 对不同入射功率 (1 W, 5 W, 10 W, 15 W, 20 W, 25 W, 30 W), 不同  $\theta (30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 150^\circ)$  下对预测点的耦合场进行预测. 其结果如图 5 所示. 可见训练好的神经网络在金属腔耦合场预测方面表现出了强大的功能.

同理, 将探针 1~4 及 6 测得的样本作为神经网络的训练样本, 将探针 5 测得的数据作为检测样本, 按照上述方法, 对建立的神经网络预测模型重新训练. 图 6 给出了第 5 个探针电压的预测及实测值.

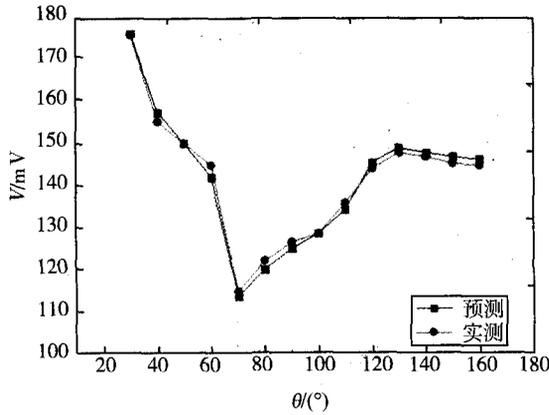
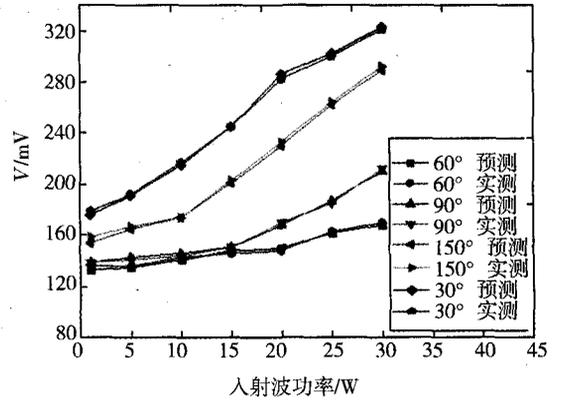
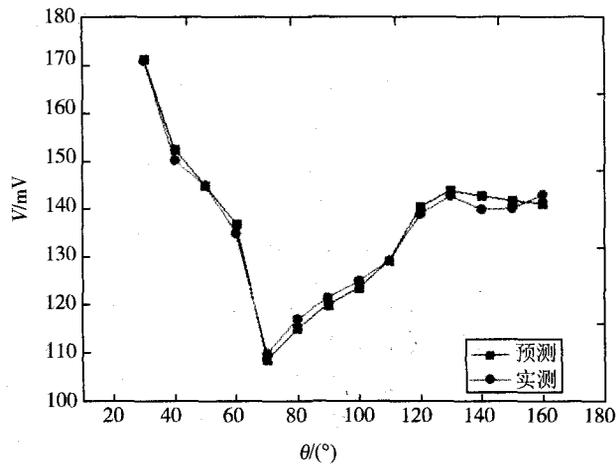
图4 仅改变 $\theta$ 时探针6的预测与实测值对比图

图5 不同入射功率、不同入射电场角度的神经网络预测值及实测值对比图

图6 仅改变 $\theta$ 时探针5神经网络的预测与实测值对比图

## 4 结束语

利用 BP 神经网络对电大金属腔耦合场进行了预测. 首先根据实验模型提取了影响电大金属腔耦合场的参数, 建立了 BP 神经网络的预测模型, 然后运用实验的方法获得了神经网络所需的训练样本和测试样本, 并对网络进行训练, 最后用测试样本对训练好的网络进行了验证. 结果显示, BP 神经网络在预测电大金属腔的前后门耦合场是可靠且有效的. 且 BP 神经网络预测不需 3D 建模及大量的计算, 仅需要一些训练数据, 而这些数据可通过仿真或者测试获得, 一旦训练完成, 神经网络可以快速及时地给出既定条件下的结果. 虽然在此模型中, 只考虑了三个变化参数, 但是可以看出, 神经网络也可以用来构建参数更多模型更复杂的系统. 这也是下一步研究的内容.

## 参 考 文 献

- [1] GHAFORZADEH A, FOROORAGHI K. Analysis of an inclined semi-circular slot in the narrow wall of a rectangular waveguide[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009, 90:323-339. DOI:10. 2528/PIER09012002.
- [2] 阙润田. 电磁兼容测试技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [3] 余小平, 奚大顺. 电子系统设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [4] 张亚普, 达新宇, 谢铁城. 偏心孔缝箱体屏蔽效能电磁拓扑分析算法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(5): 994-1002. DOI:10. 13443/j. cjors. 2013090602.
- [5] CERRI G, DE LEO R, PRIMIANI V M. Theoretical and experimental evaluation of the electromagnetic radiation from apertures in

- shielded enclosure[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*,1992,34(4):423-432. DOI:10.1109/15.179275.
- [6] Li M, Nuebel J, Drewniak J L, et al. EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*,2000,42(1):29-38.
- [7] XU K, FAN Z, DING D Z, et al. Gpu accelerated unconditionally stable crank-nicolson ftdtd method for the analysis of three-dimensional microwave circuits[J]. *Progress In Electromagnetics Research*,2010,102:381-395. DOI:10.2528/pier10020606.
- [8] CARPES W P, PICHON L, RAZEK A. Analysis of the coupling of an incident wave with a wire inside a cavity using an FEM in frequency and time domains [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2002, 44 (3): 470-475. DOI: 10.1109/temc.2002.801767.
- [9] DEVABHAKTUNI V K, YAGOUB M C E, FANG Y, et al. Neural networks for microwave modeling: Model development issues and nonlinear modeling techniques[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*,2000,11(1):4-21.
- [10] Wang F, Devabhaktuni V K, Zhang Q J. A hierarchical neural network approach to the development of library of neural models for microwave design[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*,1998,46(12):2391-2403.
- [11] Wang F,Zhang Q J. Knowledge-based neural models for microwave design[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 1997,45(12):2333-2343.
- [12] BENHASSINE S, PICHON L, TABBARA W. An efficient finite-element time-domain method for the analysis of the coupling between wave and shielded enclosure[J]. *IEEE Trans Magn*,2002,38(2):709-712. DOI:10.1109/20.996184.
- [13] RAJAMANI V, BUNTING C F, DESHPANDE M D, et al. Validation of Modal/MoM in Shielding Effectiveness Studies of Rectangular Enclosures With Apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, 48 (2): 348-353. DOI: 10.1109/temc.2006.873864.

## Prediction Based on a Neural Network for Coupling Fields of Electrically Large Rectangular Metal Cavity

LIU Weina, ZHAN Huawei

(College of physics and Electronic Engineering, Henan normal university; Henan Key Discipline Open Laboratory of Electromagnetic Wave Detecting, Xinxiang, 453007, China)

**Abstract:** Electromagnetic sensitive points of electrical-large rectangular metal cavity have been calculated in the case of front and back door coupling fields. Neural network method is used to predict coupling fields by measurement some local fields of the cavity. It is difficult for electrical- large rectangle metal cavity to obtain coupling fields by full wave and wavelet analysis. The neural network method need not consider complexities of internal structure and can realize nonlinear prediction. Therefore, it can be applied in predicting the front and back door coupling fields of the cavity. We extract target parameters and create the prediction model of BP neural network by experiment design. That is, under irradiation of the TEM wave, input parameters of BP network are incident wave power, polarized direction and position coordinates of predicted points. Output parameter is the voltage of the corresponding points. The prediction model of coupling fields are established after proper training and the coupling fields of the detected points are predicted by the model. Research results show that the method is effective and accurate. That is , an effective method is provided for calculation coupling fields of electrical-large metal cavity.

**Keywords:** rectangle enclosure; electrical-large; neural network; electromagnetic compatibility; prediction