



·高功率微波技术·

基于 BP 神经网络的六边形孔阵耦合截面的预测

贺智彬, 闫丽萍, 赵翔

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 孔缝耦合截面作为度量电磁能量经孔缝泄漏强弱的重要参数, 一直没有一个普适快速且精度较高的获取方法。针对六边形孔阵归一化耦合截面的获取问题, 分析了垂直入射条件下各因素对六边形孔阵耦合截面的影响, 选择合适的参数并使用全波分析法共获取 13 820 组耦合截面数据。对部分输入参数进行预处理后输入神经网络进行训练, 构建了一个以孔单元电尺寸、行/列数、行/列间距电尺寸、孔壁厚度电尺寸、入射波极化角度等 7 个参数为输入, 归一化耦合截面为输出的 BP 神经网络模型。该模型在预测电尺寸为 [0.1, 1.2] 时的归一化耦合截面平均相对误差为 3.8%。选取未出现在神经网络训练集与测试集中的输入参数, 比较全波分析法计算值和神经网络预测值共 480 组数据, 其平均相对误差为 7.27%。最后通过实验测量, 进一步验证了该模型的普适性和有效性。

关键词: 耦合截面; 六边形孔阵; 神经网络; 全波分析法; 预测精度

中图分类号: TN911

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210566

Prediction of coupling cross section of hexagonal aperture array based on BP neural network

He Zhibin, Yan Liping, Zhao Xiang

(College of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As an important parameter to measure the leakage of electromagnetic energy through apertures, there has not been a universal, fast and high precision method to obtain the coupling cross section (CCS). For obtaining the hexagonal aperture array normalized CCS, we analyze the influence of various factors on it under the condition of vertical incidence. A total of 13 820 sets of CCS data are obtained by selecting appropriate parameters and using full-wave analysis method. After some input parameters are preprocessed and the neural network is trained, a BP neural network model has been constructed with seven parameters including the electrical dimension of the aperture unit, row/column number, the electrical dimension of the row/column distance, the electrical dimension of the aperture wall thickness and polarization angle of incident wave as the input and the normalized CCS as the output. The model has an average relative error of 3.8% when the predicted normalized CCS of the hexagonal aperture array has the electrical dimensions [0.1, 1.2]. A total of 480 CCSs with input parameters not appearing in both the training set and the test set are predicted by the neural network and compared with the full-wave analysis results, and the average relative error is 7.27%. Finally, the universality and effectiveness of the model are validated further by experimental measurement.

Key words: coupling cross section, hexagonal aperture array, neural network, full wave analysis method, prediction accuracy

孔缝耦合截面(CCS)是在对电磁能量经孔缝传输/泄漏分析过程中的一个重要参数^[1-4], 定义为穿过孔缝的功率与入射波功率密度的比值。孔缝耦合截面常用来度量电磁能量经孔缝泄漏的强弱, 是用于对电磁屏蔽效能分析的功率平衡法(PWB 方法)^[5-6]的一个关键参数。为了获取孔缝耦合截面, 1950 年, Levine 等给出了针对圆形孔缝的

* 收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-03-17
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61877041)
联系方式: 贺智彬, hzb2500199128@qq.com。
通信作者: 赵翔, zhaoxiang@scu.edu.cn。

矢量近似法,并采用该方法计算出电磁波穿过无限大平板,垂直入射条件下圆形孔缝的耦合截面^[7]。1953年,Huang采用实验测量法测量了矩形孔缝的耦合截面^[8]。随后,Huang等结合Levine等的矢量近似法和实验测量法,计算出椭圆孔耦合截面的近似值^[9]。之后人们对圆形和矩形等简单几何形状的孔缝耦合截面的计算方法不断进行了优化和改进^[10-12],但其所研究的经验公式法只适用于计算形状规则、电尺寸集中在电小或电大区的耦合截面,而所研究的全波分析法则需要耗费大量的计算成本。近年来,祝磊等和丁星丽等分别建立了单圆孔和圆孔阵列的BP神经网络(NN)预测模型^[13-14],为快速且准确获取孔缝耦合截面提供了新的方法。

正六边形孔阵作为最常见的一类通风孔阵,已经被证明在相同条件下相比于圆形孔阵和矩形孔阵有着更小的耦合截面^[15]。但目前关于六边形孔阵耦合截面的研究较少,一直没有一个理想的公式或简单的方法能够快速准确且普适地获取正六边形孔阵的耦合截面。因此本文通过全波分析软件计算的大量结果作为训练参数,建立一个能够快速预测六边形孔阵耦合截面的BP神经网络模型。本文同时对BP神经网络进行优化,通过探寻各输入参数与六边形孔阵耦合截面的关系,获取最适用于BP神经网络训练的参数范围并对其获取的数据进行预处理,以提升神经网络的精度和降低神经网络的复杂度。

1 基于全波分析法的神经网络训练数据获取及其预处理

1.1 神经网络训练数据获取

目前研究表明,孔阵中孔单元电尺寸、行列数、孔单元数、孔间距、入射波的入射角度和极化角度的变化均会影响孔阵的耦合截面^[16-17]。本文仅考虑入射波垂直于孔缝入射的情况,基于全波分析软件建立了如图1所示的数值实验系统,用来获取构建BP神经网络的原始数据。

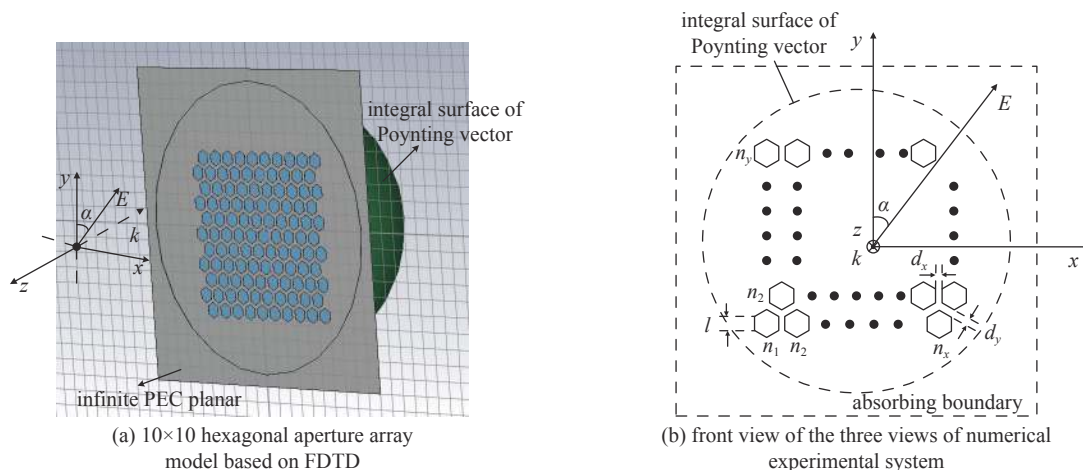


Fig. 1 Numerical experimental system model

图1 数值实验系统模型

图1(b)中, l 为孔单元边长(mm); n_x, n_y 分别为 x, y 方向孔的个数(列、行数); d_x, d_y 分别为 x, y 方向的孔间距(列、行间距); α 为入射波的极化角度。将孔阵中孔单元边长、行间距、列间距都以电尺寸的形式表示,则孔单元电尺寸为 l/λ ,行、列间距电尺寸为 $d_y/\lambda, d_x/\lambda$ 。

不同频率和极化角度的入射波垂直穿过无限大开孔阵的平板后,计算平板另一侧包围六边形孔阵的半球面上坡印廷矢量的面积分,即穿过孔阵的功率。穿过孔阵的功率与平面波功率密度的比值即为孔缝阵列的耦合截面,孔缝阵列的耦合截面与其几何面积的比值即为孔缝阵列的归一化耦合截面。可得六边形孔阵列归一化耦合截面 φ 的计算公式为

$$\varphi = \frac{2 \int_A \mathbf{S} \cdot \mathbf{n} dA}{3 \sqrt{3} n_x n_y l^2 S_i} \quad (1)$$

式中: A 为半球面; \mathbf{S} 为坡印廷矢量; \mathbf{n} 表示球面的法向量; S_i 为入射波的功率密度。

1.2 六边形孔阵耦合截面影响因素的分析及数据预处理

首先固定孔间距为5 mm,入射波极化角度为45°,孔壁厚度为0.1 mm,分别建立2×1, 4×1, 7×1, 10×1和1×2, 1×4, 1×7, 1×10不同的单行或单列的孔阵模型以及六边形单孔模型。通过全波分析法计算其归一化耦合截面如图2

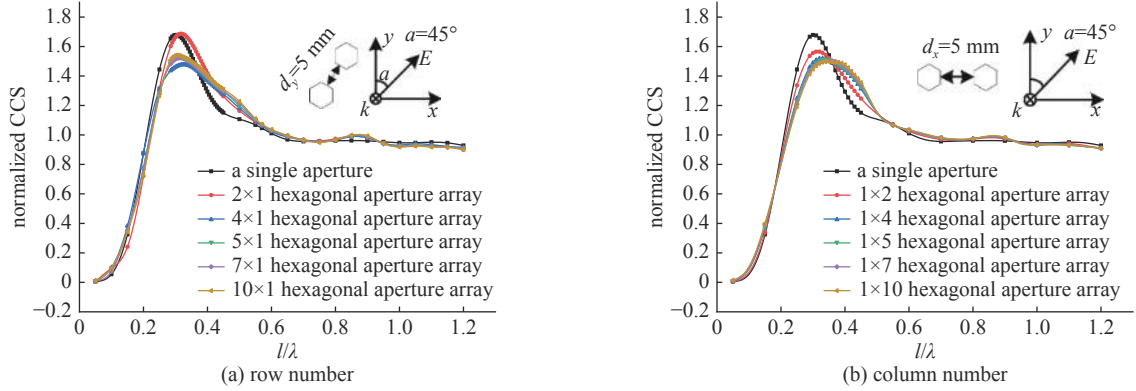


Fig. 2 Effect of row/column number on the normalized CCS

图2 行列数对孔缝耦合截面的影响

所示。

由图2可知,在垂直入射的情况下,不同类型孔缝阵列的归一化耦合截面变化趋势基本相同。单孔归一化耦合截面随孔单元电尺寸先增大后减小,在 l/λ 为0.295时达到峰值,随后减少,并在 l/λ 为0.5之后趋近于1。因此,在后文构建神经网络模型的输入参数中, l/λ 在 $[0, 0.5]$ 内取样点要比在 $[0.5, 1.2]$ 内更多,最大值取得为1.2。当行数或者列数超过7以后,归一化耦合截面趋于一致,因此在获取神经网络输入数据时,最大行列数均取8。

建立水平排列(即1行2列)的双孔阵模型,固定孔壁厚度为0.1 mm,计算不同孔间距的双六边形孔阵耦合截面如图3所示。将极化角度为 0° 时六边形孔阵归一化耦合截面作为参考基准,计算其他极化角度与 0° 时的归一化耦合截面绝对差值如图4所示。

由图3和图4可知,极化角度对孔阵归一化耦合截面的影响主要集中在 l/λ 为 $[0.1, 0.35]$ 之内。以极化角度为 0° 时的归一化耦合截面作为参考基准,其他极化角度与 0° 的归一化耦合截面绝对差值最高可达0.375;对于其他孔单元电尺寸范围,极化角度对其归一化耦合截面的影响偏小。其次,可以观察到,在孔间距较为紧凑的范围[5 mm,

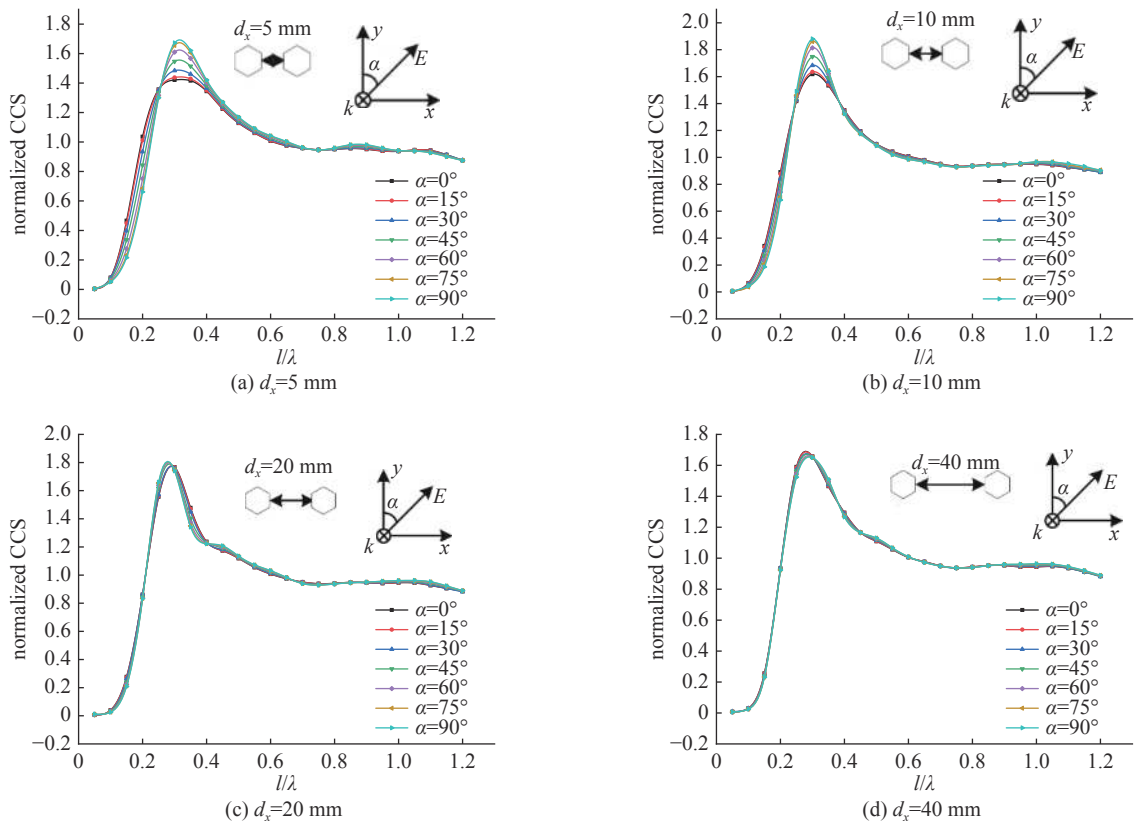


Fig. 3 Effect of polarization angle on the normalized CCS

图3 极化角度对孔阵归一化耦合截面的影响

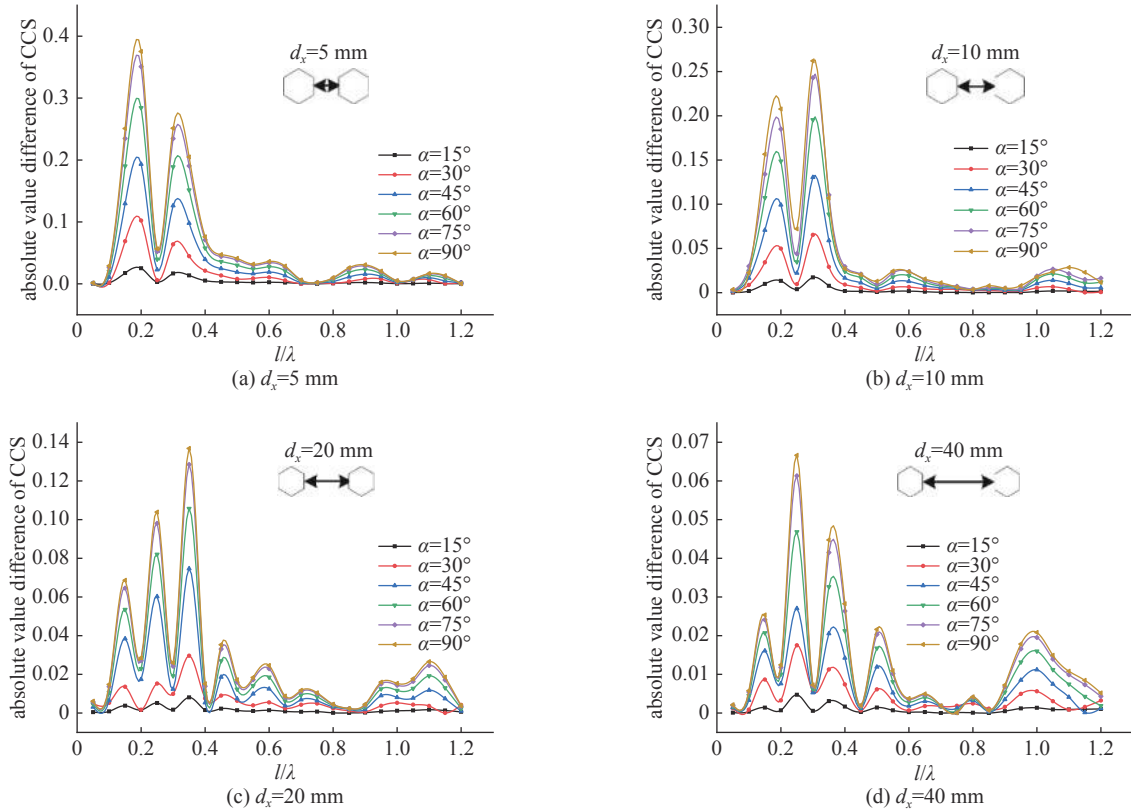


Fig. 4 Absolute difference of normalized CCS between other polarization angles and 0°

图 4 其他极化角度与 0° 归一化耦合截面绝对差值

30 mm] 内, 孔与孔之间的互耦较强, 因此在此范围内极化角度对归一化耦合截面影响较大; 在孔间距范围为 [40 mm, 80 mm] 时, 极化角度对归一化耦合截面影响较小, 以极化角度为 0° 时的归一化耦合截面作为参考基准, 其他极化角度与 0° 的归一化耦合截面绝对差值均不超过 0.1。因此在后续获取神经网络训练样本时, 孔间距最大值选择为 30 mm。

为了更清晰直观的得到六边形孔阵归一化耦合截面随极化角度和孔间距电尺寸的变化规律, 选择 l/λ 为 0.295, 绘制归一化耦合截面随极化角度和孔间距电尺寸的变化规律如图 5 所示。

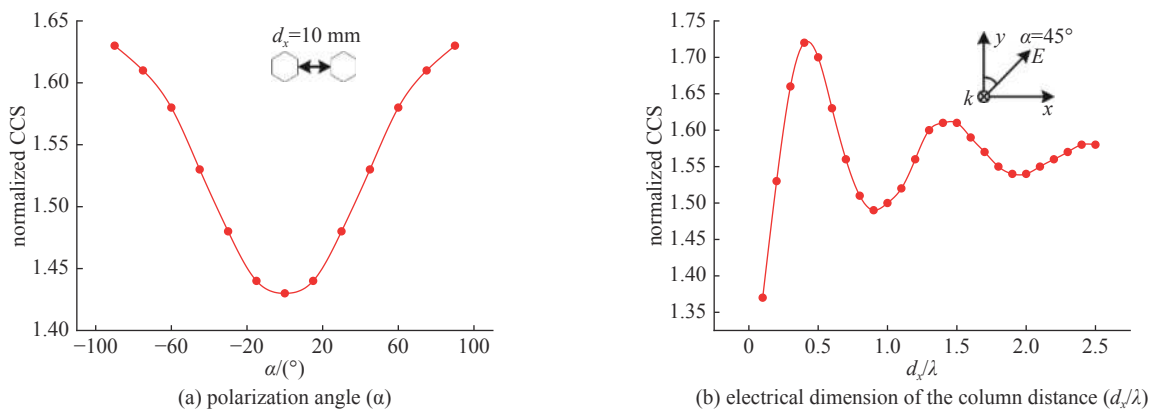


Fig. 5 Variation of normalized CCS with α and d_x/λ while l/λ is 0.295

图 5 电尺寸为 0.295 时孔阵归一化耦合截面随极化角度和孔间距电尺寸的变化

由图 5(a) 得, 双六边形孔归一化耦合截面随极化角度呈现类似三角函数趋势并表现出对称性。由图 5(b) 可得, 归一化耦合截面随孔间距电尺寸的变化规律近似 Sa 函数, 且孔间距电尺寸越小, 孔间距对六边形孔阵归一化耦合截面的影响越大。因此对后续获取数据的极化角度作正弦变化, 对孔间距作 Sa 函数变化。

基于上述对耦合截面影响因素的分析, 使用全波分析法计算了各输入参数不同值下的归一化耦合截面, 一共获取了 13820 组数据样本。其输入参数的变化范围如表 1 所示。

表 1 输入参数变化范围
Table 1 Range of input parameters

l/λ	n_x	n_y	d_x/λ	d_y/λ	α	h/λ
0.05~1.20	1~8	1~8	0.025~3.000	0.025~3.000	0~ $\pi/2$	0.0005~3.0000

2 BP 神经网络的构建以及预测效果

2.1 神经网络的构建

基于上述讨论,本文建立了以孔单元电尺寸(l/λ)、孔阵列数(n_x)、孔阵列行数(n_y)、列间距电尺寸(d_x/λ)、行间距电尺寸(d_y/λ)、孔壁厚度电尺寸(h/λ)、极化角度(α)为输入参数,孔阵的归一化耦合截面为输出参数的 BP 神经网络。文中对归一化耦合截面预测模型的评价标准采用均方根误差 RMSE 和决定系数 R^2 ,其定义分别如下

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

式中: $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示数据样本输出值; $\hat{y}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示神经网络预测输出值; \bar{y} 表示 y_i 的平均值。其中, RMSE 越接近于 0, 说明神经网络模型的精度越高。当 R^2 在 $[0, 1]$ 范围内时, 其值越大则表明模型的效果越好; 当 R^2 小于 0 时, 说明该神经网络模型完全没有预测能力。

对已经获取到的 13820 组数据, 取 80% 作为训练集, 20% 作为测试集。比较了不同隐含层层数(单层、双层和三层)、每层隐含层中不同神经元数的神经网络模型的精度及配置不同激励函数、训练函数及输出函数的神经元数目都为 50 的双层神经网络模型精度。最终选择神经元数目分别为 50, 50, 30 的三层隐含层神经网络用来预测六边形孔阵归一化耦合截面, 其隐含层激励函数为对数-S 型传输函数 logsig 函数, 输出层激励函数为线性函数 purelin 函数, 训练函数为基于 Levenberg-Marquardt 算法的 trainlm 函数。设置迭代次数为 10000, 学习速率为 0.001。得到训练集均方根误差 RMSE 为 0.00092, 决定系数 R^2 为 0.99999, 测试集 RMSE 为 0.0054, R^2 为 0.99999。

2.2 BP 神经网络拟合效果分析及其对六边形孔阵归一化耦合截面的预测

为了更细致地反映神经网络的预测效果, 我们在每个样本上定义绝对误差 E_i 和相对误差 δ_i , 并用它们的统计结果来反映预测效果, 其定义如下

$$E_i = |y_i - \hat{y}_i| \quad (4)$$

$$\delta_i = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100\% \quad (5)$$

使用训练集中 11056 组数据进行神经网络拟合训练, 其相对误差分布直方图如图 6 所示。可以看出构建的神经网络模型拟合值和样本值之间比较吻合, 平均相对误差为 1.9%, 最大绝对误差为 0.056; 85.5% 的数据相对误差小于 1%, 97% 的数据相对误差小于 20%。由图 7 电尺寸与神经网络拟合结果误差关系图可得, 相对误差大的数据集中在电尺寸小的区域, 这一部分耦合截面的数量级在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 之间, 因此即使在此区间内最大误差仅为 0.034 的时候, 该区间内的相对误差也会被“夸大”。在非电小尺寸中, l/λ 在 $[0.25, 0.45]$ 范围内最大相对误差为 3.7%, 平均相对误差为 0.85%; l/λ 在 $[0.5, 1.2]$ 范围内最大相对误差为 0.28%, 平均相对误差为 0.04%。

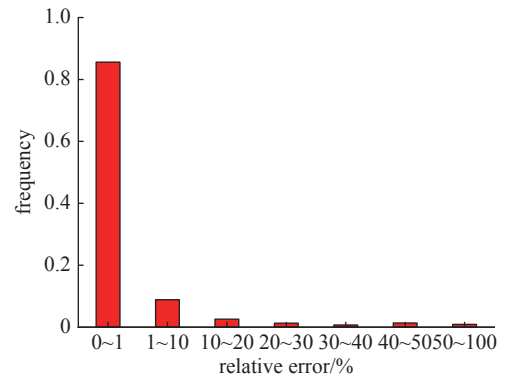


Fig. 6 Histogram of relative error distribution of neural network fitting results

图 6 神经网络拟合结果相对误差分布直方图

使用拟合得到的神经网络模型对测试集中 2764 组数据进行预测, 相对误差分布直方图如图 8 所示。所有数据的平均相对误差为 3.8%, 最大绝对误差为 0.059; 73.1% 的数据相对误差小于 1%, 94.4% 的数据相对误差小于

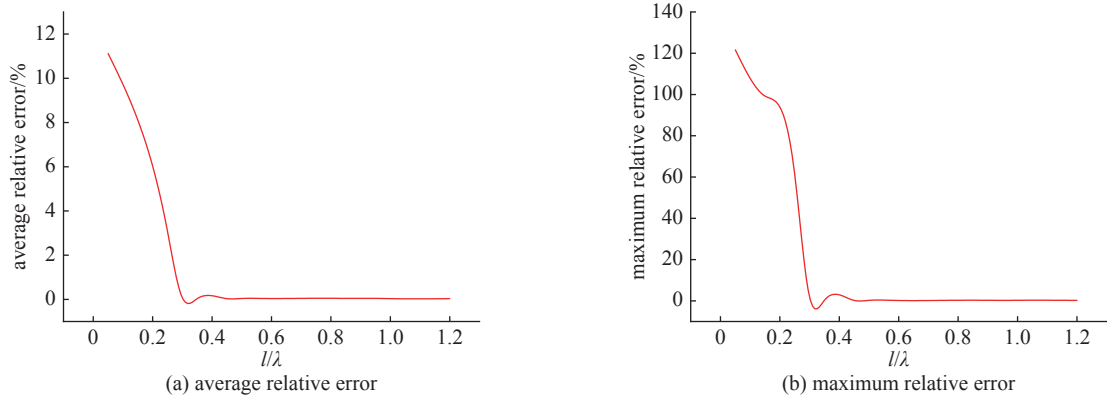


Fig. 7 Relation between l/λ and error of neural network fitting result

图 7 电尺寸与神经网络拟合结果误差关系图

20%。同样相对误差较大的数据集中在电尺寸小的部分。在 l/λ 为 $[0.25, 1.2]$ 范围内 88.85% 的数据相对误差小于 1%，平均相对误差为 0.68%。

为了进一步验证该神经网络的普适性和有效性，选取孔间距等未出现在训练集和测试集中的输入参数，建立了 3 行 6 列和 8 行 8 列两组模型。由全波分析法计算出 480 组数据并与上述建立的神经网络模型预测结果进行比较。所有数据平均相对误差为 7.27%，73.3% 的数据相对误差小于 10%。在非电小区间 l/λ 为 $[0.295, 1.2]$ 范围内，其平均相对误差为 4.83%。随机选取两组数据绘制预测结果与样本值比较如图 9 所示，由此可见，该神经网络具有很好的普适性和有效性。

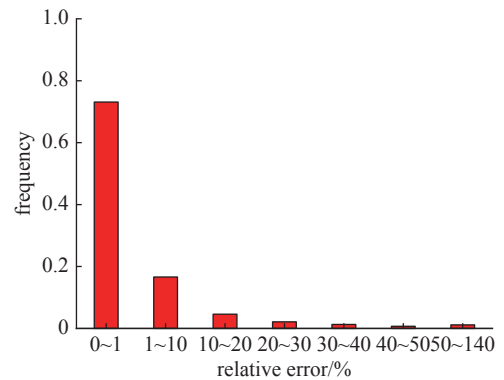


Fig. 8 Histogram of relative error distribution of neural network prediction results

图 8 神经网络预测结果相对误差分布直方图

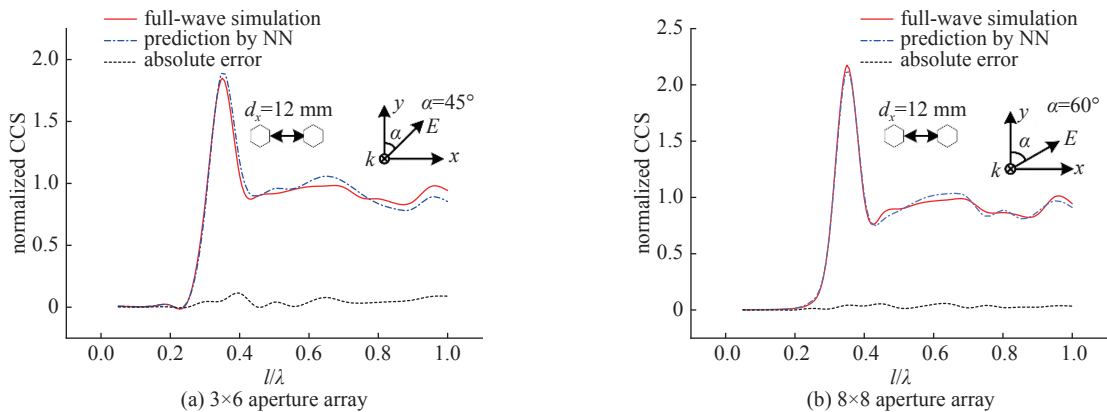


Fig. 9 Comparison of predicted values of neural network and true values

图 9 神经网络预测值与真实值比较图

3 实 验

在微波暗室中设计并搭建了如图 10(a) 的实验系统进行归一化耦合截面的测量，用以验证神经网络预测的准确性。实验通过喇叭天线辐射如图 10(b) 开有 3 行 3 列的六边形孔缝阵列的金属板，对金属板后的电场强度进行测量，实验测量现场如图 10(c) 所示。

将孔缝后泡沫箱每个面均匀划分成面积相同的小块，在每个小块中心取一个点。分别测量每点电场的分量，计算出每个点处垂直穿过该点所在平面的功率流密度。计算所得的功率流密度与该小块的面积相乘，最后将所有值相加即可得到经由孔缝泄漏出的功率。实验测量的 3 行 3 列的六边形孔缝阵列归一化耦合截面值与其神经网络预测值和全波分析法所得值如图 11 所示。

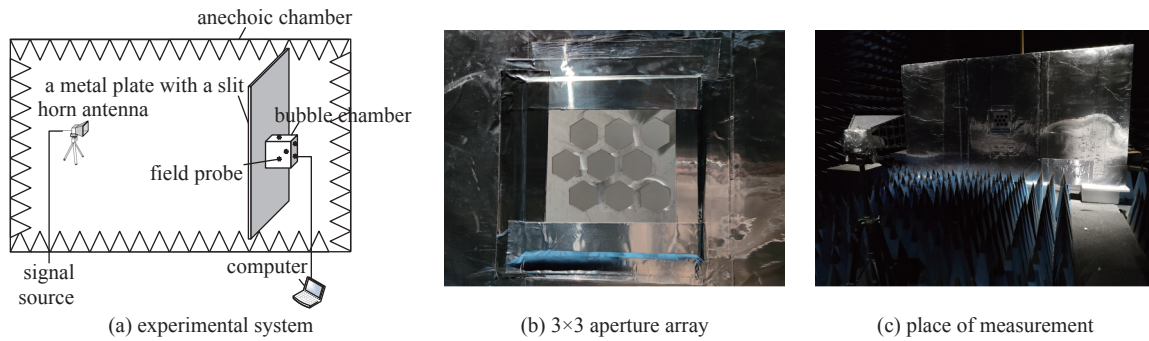


Fig. 10 Experimental system in anechoic chamber
图 10 微波暗室实验图

由图 11 可知,全波分析法结果、测量结果和神经网络预测结果趋势一致,误差较小。BP 神经网络预测结果准确。

4 结论

本文针对六边形孔阵归一化耦合截面的获取问题,研究了六边形孔阵耦合截面相关因素的影响,选择合适的参数并且对部分输入参数进行了筛选和预处理。构建了快速预测六边形孔缝阵列归一化耦合截面的神经网络,该模型在预测 l/λ 为 $[0.1, 1.2]$ 时的六边形孔缝阵列归一化耦合截面时精度较高,平均相对误差为 3.8%。随后对神经网络训练值之外的耦合截面进行预测,其平均相对误差为 7.27%,并且通过实验测量,验证了此模型的普适性和准确性。本文结果可用于对六边形孔阵结构的电磁能量泄漏和传输的快速评估,所采用的神经网络建模方法也可为相关研究提供借鉴和参考。

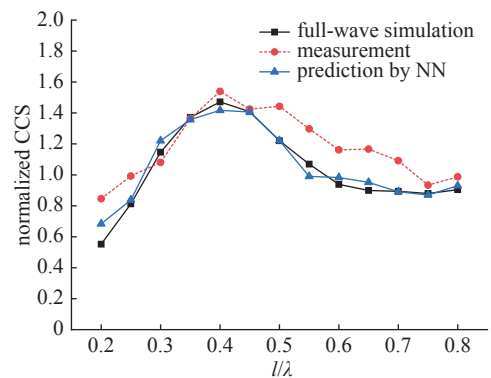


Fig. 11 Comparison of predicted values of neural network and experimental result

图 11 实验测量结果与神经网络预测结果对比

参考文献:

- [1] Cho Y, Son H W, Choi J Y. Transmission resonance through small apertures[C]//2012 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics. 2012: 1-3.
- [2] Lee S W, Zarrillo G, Law C L. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, 30(5): 904-909.
- [3] Martin T, Backstrom M, Loren J. Semi-empirical modeling of apertures for shielding effectiveness simulations[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, 45(2): 229-237.
- [4] Gunnarsson R, Bäckström M. Transmission cross section for apertures and arrays calculated using time-domain simulations[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2014: 169-174.
- [5] Hill D A, Ma M T, Ondrejka A R, et al. Aperture excitation of electrically large, lossy cavities[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1994, 36(3): 169-178.
- [6] Holloway C L, Hill D A, Sandroni M, et al. Use of reverberation chambers to determine the shielding effectiveness of physically small, electrically large enclosures and cavities[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, 50(4): 770-782.
- [7] Levine H, Schwinger J. On the theory of electromagnetic wave diffraction by an aperture in an infinite plane conducting screen[J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1950, 3(4): 355-391.
- [8] Huang C, Kodis R D. The measurement of aperture transmission coefficients[R]. Cruft Lab Harvard University, 1953: 165.
- [9] Huang Cha'ang, Kodis R D, Levine H. Diffraction by apertures[J]. *Journal of Applied Physics*, 1955, 26(2): 151-165.
- [10] Koch G F, Kolbig K S. The transmission coefficient of elliptical and rectangular apertures for electromagnetic waves[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1968, 16(1): 78-83.
- [11] Rahmat-Samii Y, Mittra R. Electromagnetic coupling through small apertures in a conducting screen[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1977, 25(2): 180-187.
- [12] Davis J G, Shakespeare P, Kiley N. Evaluation of circular aperture transmission coefficients in the presence of obscurations[C]//IET 8th International Conference on Computation in Electromagnetics (CEM 2011). 2011: 1-2.

- [13] 祝磊, 刘强, 赵翔, 等. 基于BP神经网络的圆形孔缝耦合截面预测[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 033201. (Zhu Lei, Liu Qiang, Zhao Xiang, et al. Prediction of coupling section of circular aperture based on BP neural network[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 033201)
- [14] 丁星丽, 赵翔, 闫丽萍, 等. 基于神经网络的圆孔阵列垂直入射耦合截面预测[J]. *无线电工程*, 2020, 50(5): 383-389. (Ding Xingli, Zhao Xiang, Yan Liping, et al. Prediction of vertical incident coupling cross section of circular aperture array based on neural network[J]. *Radio Engineering*, 2020, 50(5): 383-389)
- [15] Paoletti U, Suga T, Osaka H. Average transmission cross section of aperture arrays in electrically large complex enclosures[C]//2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2012: 677-680.
- [16] Olyslager F, Laermans E, De Zutter D, et al. Numerical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1999, 41(3): 202-213.
- [17] 李锐. 微波脉冲与带孔阵腔体、带介质窗口腔体耦合的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007. (Li Rui. Study on the coupling of microwave pulses into the cavity with aperture arrays and the cavity with a dielectric slot[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007)