

文章编号: 2095-4980(2025)03-0264-08

基于双级神经网络的多形状孔阵 CCS 普适性模型

王 婕, 闫丽萍, 赵 翔*

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 孔缝耦合截面(CCS)是评估孔缝穿透效应的重要参数, 使用 BP 神经网络预测 CCS, 其预测速度远高于全波分析法, 且精确度优于传统公式法。本文围绕能够适用于多种单元形状孔阵 CCS 的预测模型展开研究, 提出 3 种用于预测孔阵 CCS 的神经网络模型, 包括 1 种单级模型和 2 种双级模型。以正六边形孔阵为例对比 3 种模型的性能, 结果表明引入先验信息最多的双级模型性能最优。该模型预测正六边形孔阵 CCS 的均方根误差为 0.017 2, 决定系数为 0.999 1。将该模型进行迁移, 可实现对圆形孔阵和方形孔阵 CCS 的预测, 其样本的平均相对误差为 1.94%。预测结果证实了该模型的精确性、高效性和普适性。

关键词: 双级神经网络; 多种孔单元形状; 孔缝阵列; 耦合截面; 普适性

中图分类号: TN911

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024230

Universal model of CCS for aperture arrays with multiple shapes based on two-stage neural network

WANG Jie, YAN Liping, ZHAO Xiang*

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

Abstract: The Coupling Cross Section(CCS) of aperture is an important parameter to evaluate the effect of aperture penetration. Using BP neural network to predict CCS has a much higher prediction speed than full-wave analysis and better accuracy than traditional formula methods. This paper focuses on the prediction model which can be applied to multi-shape aperture array. Three neural network models are proposed to predict the CCS of aperture array, including one traditional single-stage model and two two-stage models. Taking the regular hexagonal aperture array as an example, the performance of the three models is compared. These results show that the double-level model with the most prior information performs the best. The Root Mean Square Error(RMSE) of the CCS prediction for the regular hexagonal aperture array by this model is 0.017 2, and the coefficient of determination(R) is 0.999 1. When this model is transferred, it can predict the CCS of circular and square aperture arrays, with an average relative error of 1.94% for the samples. The prediction results confirm the precision, efficiency, and universality of the model.

Keywords: two-stage neural network; multiple aperture unit shapes; aperture array; Coupling Cross Section(CCS); universality

孔缝耦合是外界电磁波进入电子系统的主要途径之一, 故研究孔缝耦合问题对于提高电子系统的抗干扰能力至关重要^[1-3]。其中孔缝的耦合截面(CCS)是描述孔缝耦合效应的重要参数, 通常用于量化孔缝对电磁波传输的影响^[4-6]。因此, 准确获取孔缝 CCS 在研究孔缝耦合问题中显得尤为重要。

1950 年, Levine 等^[7]提出了单圆孔在平面波垂直入射下计算其 CCS 的公式; 1993 年, Andersson^[8]将研究范围扩展至孔阵列, 探究了孔缝阵列相关的多个参数对 CCS 的影响; 随着开孔形状的多样化, 2004 年, 周金山等^[9]对多种单孔形状的耦合特性进行了深入分析; 2012 年, Paoletti 等^[10]在此基础上提出了多种单元形状孔阵在电子系统外壳上平均 CCS 近似值的计算公式。但这些研究通常只适用于孔单元电尺寸集中在电小或电大区域, 或孔

收稿日期: 2024-05-15; 修回日期: 2024-06-11

*通信作者: 赵 翔 email: zhaoxiang@scu.edu.cn

缝排列较为紧密等情况,对于预测 CCS 的适用范围较为有限。直到 2019 年,祝磊、丁星丽和贺智彬等^[11-13]先后采用单级 BP 神经网络对单圆孔、圆孔阵以及正六边形孔阵 CCS 进行预测,扩大了预测 CCS 的适用范围,并获得了与全波分析法可比拟的精确 CCS 值。为优化模型结构,提高预测精确度或节省建模时间,贺智彬等^[14-15]以 Gunnarsson 提出的孔阵与单孔 CCS 存在近似关系的结论为理论基础,将孔单元与阵列的电磁耦合特性进行分开建模,将传统的单级神经网络模型扩展为双级模型^[16],但实际建模时间和预测精确度均未得到提升。

本文围绕预测孔阵 CCS 的双级神经网络模型的改进展开研究,并将其与传统的单级模型性能进行比较。通过引入基于孔单元与阵列的电磁耦合特性的先验信息,建立更具理论支撑的模型结构,增强模型的有效性和普适性。此外,本文模型还补充分析了已有研究未考虑的入射平面波方位角对孔阵 CCS 的影响,建立了影响因素更为全面的 BP 神经网络预测模型。

1 孔阵 CCS 的样本获取

为获取样本,建立如图 1(a)所示的孔缝阵列的数值实验系统。图中 ψ 为入射波的仰角,定义为入射方向与开孔的无限大 PEC(Perfect Electric Conductor)板形成的夹角; ϕ 为入射波的方位角,定义为入射方向在开孔无限大 PEC 板上的投影与 x 轴负方向所形成的夹角;图中未能清晰标出的 α 为入射波的极化角,定义为电场方向和入射面的夹角。实验中,入射波以不同入射和极化角度穿过孔缝阵列。目前,已获取了圆形、正六边形和正方形孔阵的大量数据样本。鉴于正六边形孔可视为圆形孔和正方形孔的中间态,故考虑以正六边形孔阵为例,比较不同神经网络模型在拟合和预测 CCS 时的精确度,如图 1(b)所示。图中, l 为正六边形孔的长度(mm); d_x 和 d_y 分别为列孔间距和行孔间距;通过计算图 1(a)中 PEC 板下方半球面的坡印廷矢量面积分,得到穿过孔阵的功率,由式(1)得到相应的归一化 CCS 的值。

$$\varphi_{n_x \times n_y} = \frac{2 \int S n dA}{3 \sqrt{3} n_x n_y l^2 S_i} \quad (1)$$

式中: S 为坡印廷矢量; A 为半球面积; n 为半球面的法向量; n_x 和 n_y 分别为孔阵的列数和行数; S_i 为入射波的功率密度; $\varphi_{n_x n_y}$ 为 n_x 列 n_y 行的正六边形孔阵归一化 CCS。

本文将 l 、 d_x 、 d_y 和孔壁厚度 h 用电尺寸表示,即孔单元电尺寸为 l/λ ,行列间距电尺寸分别为 d_x/λ 和 d_y/λ ,孔壁厚度电尺寸为 h/λ 。

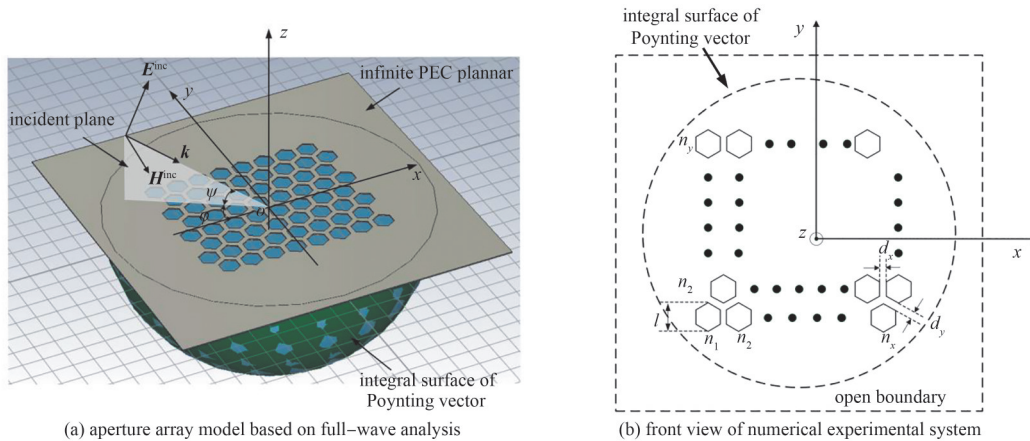


Fig.1 Numerical experimental system model

图1 数值实验系统模型

已有研究分析了孔单元的电尺寸、孔阵的行列数、行列间距、孔壁厚度、入射波极化角和仰角因素对孔阵归一化 CCS 的影响^[17-19],本文进一步补充入射波方位角对孔阵 CCS 的影响。不失一般性,建立 5 行 6 列的正六边形孔阵模型,并固定孔壁厚度为 0.1 mm,行列间距为 5 mm,入射波极化角为 0° ,仰角为 60° 。图 2(a)为在固定孔单元电尺寸下,归一化 CCS 随方位角变化的曲线。由于孔单元电尺寸为 0.7 时,归一化 CCS 的数值较大且变化明显,有助于更清晰地观察入射波方位角对归一化 CCS 的影响。因此,在图 2(b)中单独列出在该电尺寸下归一化 CCS 随方位角变化的规律。

由图 2(a)可知,在固定的任意孔单元电尺寸下,归一化 CCS 都会随着入射方位角的变化而变化。但在孔单元

电尺寸为 $[0.7, 1.5]$ 范围内, 归一化 CCS 随方位角变化较为显著。图 2(b) 为电尺寸固定在 0.7 时的变化曲线, 表明孔阵归一化 CCS 随方位角呈现出 180° 的周期性变化。因此, 在建立神经网络模型时, 方位角范围确定为 $[0^\circ, 180^\circ]$, 避免样本数据过于冗余。此外, 根据已有研究, 入射波极化角和仰角采用正弦变化, 孔间距电尺寸则采用 Sa 函数进行预处理^[16]。

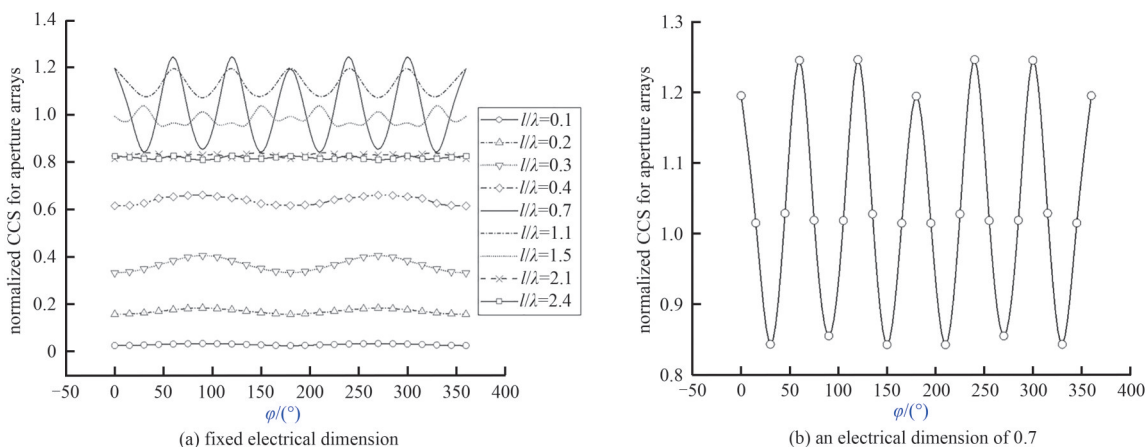


Fig.2 Variation of normalized CCS with azimuth angle
图2 归一化 CCS 随方位角的变化

2 孔阵 CCS 的 3 种神经网络模型构建

2.1 单级神经网络预测模型的构建

建立一个 BP 神经网络模型, 其输入参数包括孔单元电尺寸、孔阵行列数、行列间距电尺寸、孔壁厚度电尺寸、极化角度、仰角和方位角 9 个参数; 输出参数为孔阵的归一化 CCS, 该模型结构如图 3 所示。由于输入参数较多, 若对各参数等间隔遍历一遍, 将耗费巨大的计算资源。因此, 对各参数进行非等间隔取样, 使用全波分析法获得输入样本 21 370 组, 各参数范围详见表 1。

2.2 双级神经网络预测模型一的构建

采用与贺智彬等^[16]提出的双级神经网络模型相似但更多输入参数的结构, 将双级神经网络分为预测单孔归一化 $\phi_{1 \times 1}$ 的第一级网络和通过单孔归一化 CCS 与孔阵的相关参数进一步预测孔阵归一化耦合截面 $\phi_{n_x \times n_y}$ 的第二级网络, 模型结构如图 4 所示。并采取与单级神经网络模型相同的 21 370 组输入样本进行模型训练, 参数见表 1。

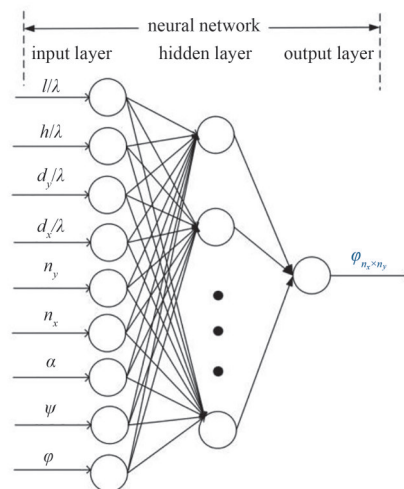


Fig.3 Single-stage neural network model
图3 单级神经网络模型

表1 单级神经网络输入参数变化范围
Table1 Variation range of single-stage neural network input parameters

parameter	l/λ	n_x	n_y	d_x/λ	d_y/λ	h/λ	α	ψ	φ
range	0.1~2.4	1~8	1~8	0.025~3.600	0.025~3.600	0.000 5~3.600 0	$0 \sim \pi/2$	$0 \sim \pi/2$	$0 \sim \pi$

2.3 双级神经网络预测模型二的构建

在模型构建中, 引入基于孔单元与阵列的电磁耦合特性的先验信息。具体而言, 平面波透过单孔与单行线性孔阵功率比 P_{n_y}/P_1 和透过单孔与单列线性孔阵功率比 P_{n_x}/P_1 的乘积是推导单孔与孔阵归一化 CCS 的关键参数。因此, 将单孔归一化 CCS、单行和单列线性孔阵与单孔的功率比作为第二级神经网络的输入参数, 并通过构建神经网络模型预测线性孔阵与单孔的功率比, 该模型结构如图 5 所示。为降低模型的复杂度, 对第二级网络的输入参数进行预处理, 将功率比转换为对数形式, 由原来的乘积关系简化为求和关系。同样采用由全波分析法获得的 21 370 组样本训练该模型, 第一级网络输入参数范围见表 1, 第二级网络的输入参数取值范围由表 2 给出。本文以 8:2 的比例划分训练集和测试集, 以评估模型的精确度和速度。

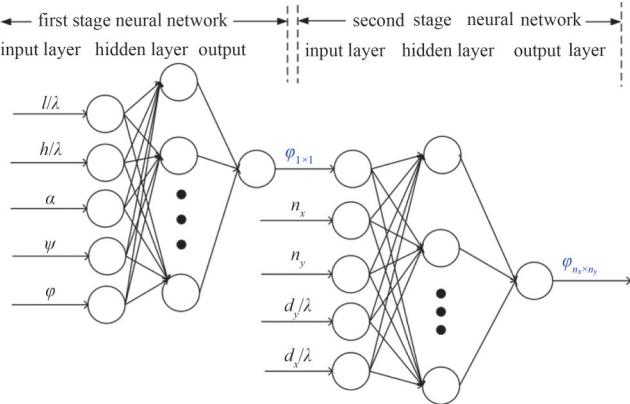


Fig.4 Two-stage neural network prediction model I
图4 双级神经网络预测模型一

表2 双级模型二的第二级输入参数取值范围

Tabel2 Range of input parameter values for the second stage neural network

parameter	$\varphi_{1 \times 1}$	$\log(P_{n_y}/P_1)$	$\log(P_{n_d}/P_1)$
range	0~1.68	-3.00~1.41	-1.49~1.31

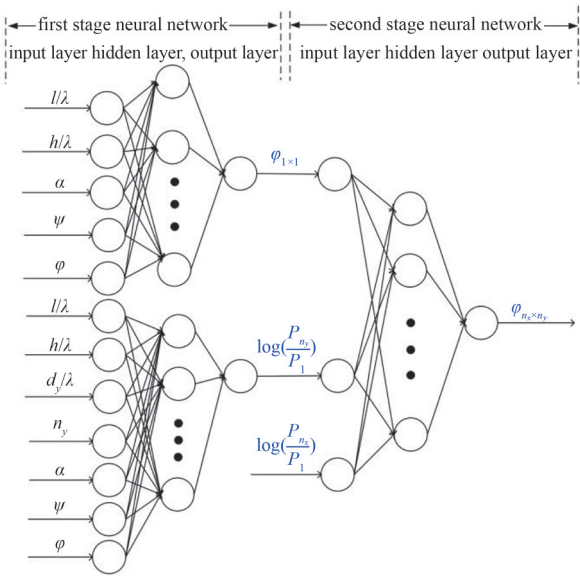


Fig.5 Two-stage neural network prediction model II
图5 双级神经网络预测模型二

3 三种模型在正六边形孔阵中的性能对比

采用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)评估模型的准确性和有效性,两指标的定义分别如式(2)~(3)所示。当 R^2 的值越接近于1, RMSE的值越接近于0时,表示模型具有更高的准确性。此外,为更细致地评估预测效果,定义每个样本的相对误差,其中第*i*个样本的定义如式(4)所示。

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

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

$$\delta_i = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_m} \times 100\%$$
 (4)

式中： y_i 和 $\hat{y}_i$ 分别为第*i*个样本的全波分析计算值和神经网络预测值； $\bar{y}$ 为样本的平均值； y_m 为样本的中位数。

3种模型的学习速率均设置为0.001,迭代次数为10 000。在神经网络中,激励函数、训练函数和隐含层的结构等因素都会对模型的预测效果产生显著影响,通过对各参数逐次寻优获得表3所示的最佳参数。结果表明,对于输入参数较多的第一级网络,基本可通过双层隐含层实现相应模型下的最佳精确度;对于输入参数相对较少的第二级网络,采用单层隐含层即可实现最佳精确度。各模型精确度的比较如图6~7所示。

表3 神经网络模型中的参数设置
Table3 Prameter settings in a neural network model

neural network models	output parameters	training function	excitation function			number of neurons	
			output layer	hidden layer I	hidden layer II	hidden layer I	hidden layer II
single-stage model	$\varphi_{n_x \times n_y}$	trainlm	purelin	logsig	logsig	50	40
two-stage model I	$\varphi_{1 \times 1}$	trainlm	purelin	logsig	logsig	30	30
	$\varphi_{n_x \times n_y}$	trainlm	purelin	logsig	-	60	-
two-stage model II	$\varphi_{1 \times 1}$	trainlm	purelin	logsig	logsig	30	30
	$\log(P_{n_y}/P_1)$	trainlm	purelin	tansig	tansig	30	30
	$\log(P_{n_d}/P_1)$	trainlm	purelin	tansig	tansig	30	30
	$\varphi_{n_x \times n_y}$	trainlm	purelin	poslin	-	80	-

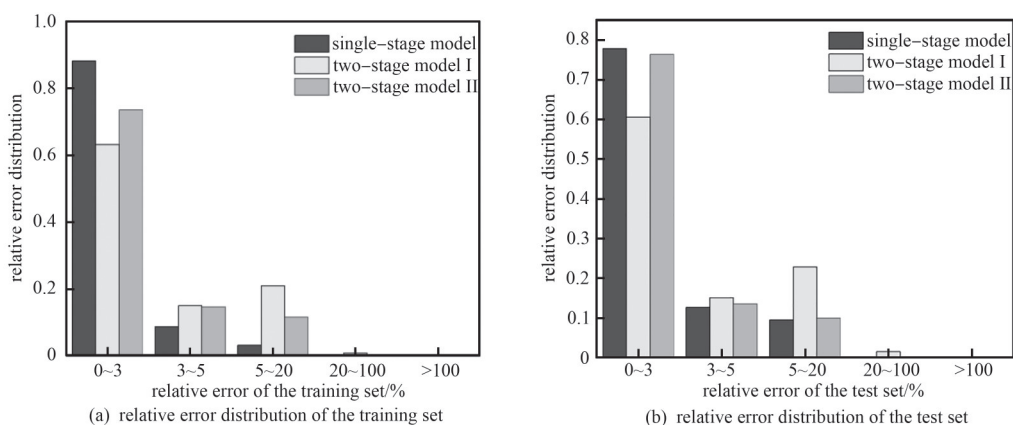


Fig.6 Comparison of relative error distribution histograms of neural network models

图6 神经网络模型相对误差分布直方图对比

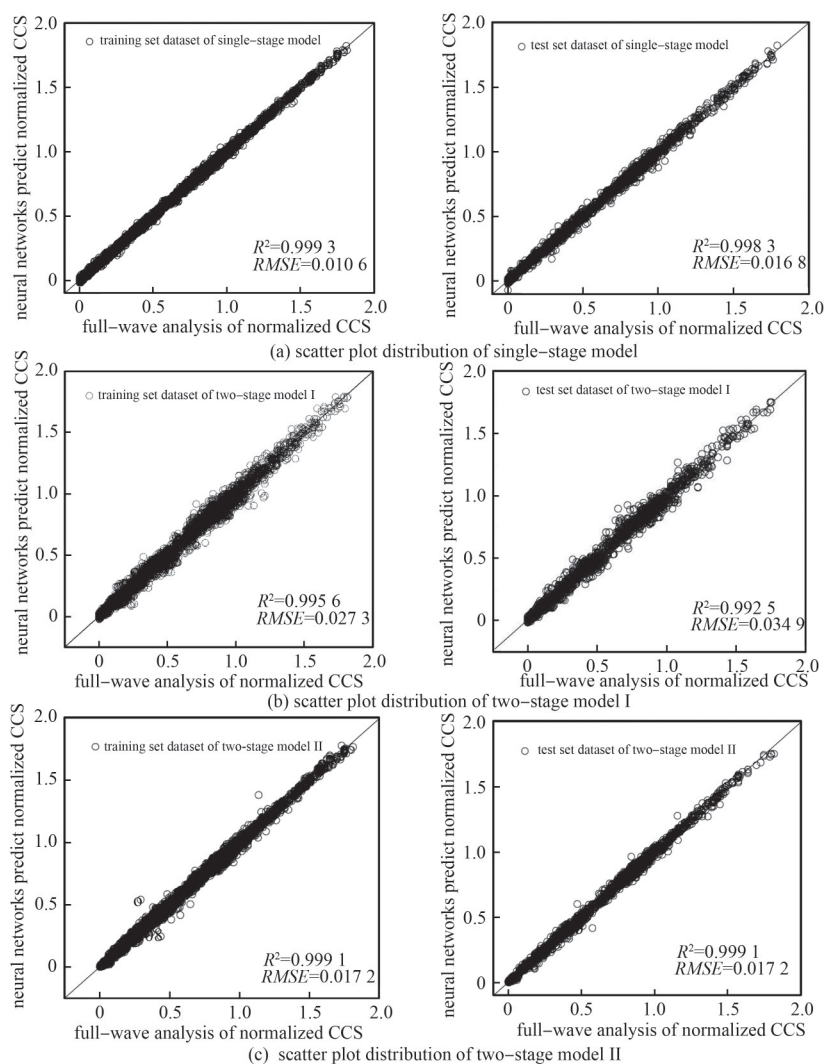


Fig.7 Scatter plot distribution of different neural network models

图7 不同神经网络模型的散点图分布

图 6(a)~(b)分别为表 3 中模型预测孔阵归一化 CCS 这一级网络的训练集和测试集上样本的相对误差分布。在训练集拟合中,传统单级模型表现出最佳的拟合精确度,其次是双级模型二,而双级模型一则表现最差。在测试集预测中,双级模型一的预测精确度最差,而单级模型和双级模型二的相对误差分布相似,均达到了较高的

精确度。具体而言，单级模型的相对误差分布依次为 77.9%、12.6%、9.5% 和 0%，双级模型二的相对误差分布为 76.5%、13.5%、10.0% 和 0%，双级模型一的相对误差分布为 60.6%、15.0%、22.9% 和 1.5%。

为更直观地呈现全波分析计算值和神经网络预测值的吻合程度，图 7 为 3 种模型拟合和预测结果的散点图分布，以及相应的 RMSE 和 R^2 指标。图中横轴表示全波分析计算值，纵轴为神经网络预测值，吻合程度越高，则样本越集中在对角线上分布。根据图 7(a) 可得，单级模型的训练集和测试集样本均集中分布在对角线上，但图 7(b) 显示双级模型一的样本偏离对角线的程度较为显著。在图 7(c) 中，训练集相较于图 7(b) 更集中在对角线上分布，测试集相较于图 7(a) 吻合程度更高。综合考虑散点图分布和模型的 RMSE 和 R^2 指标，得出训练集上单级模型的拟合精确度最高，测试集上单级模型和双级模型二的预测精确度相似且具有准确性，与图 6 的分析结果吻合。由于本文着重于模型在预测多种单元形状孔阵上的普适性，因此更关注测试集上的预测精确度，故而可适用于多种单元形状孔阵的双级模型二更具有准确性。

表 4 为 3 种神经网络模型在正六边形孔阵中的建模时间。结果表明，单级模型耗时最长，其次是双级模型二，而双级模型一耗时最短。通过将多输入参数的神经网络拆分成多级网络进行训练，有效降低了模型的复杂程度，缩短了建模时间。综合图 6~7 和表 4 结果，可得出双级模型二不仅具有精准的预测能力，且在建模时间上表现出极大优势。故而选择双级模型二作为性能最优模型，并在后续进行模型普适性的验证。

表 4 不同神经网络模型在正六边形孔阵中建模时间对比
Table 4 Comparison of different neural network modeling time in hexagonal aperture array

	single-stage model	two-stage model I	two-stage model II
modeling time	4 h 4 min 51 s	54 min 42 s	2 h 18 min 26 s

选取输入样本中未出现的参数值，由全波分析法计算出 840 组样本，其相对误差和散点图分布如图 8 所示。根据图 8(a) 可得，约有 90.6% 的数据相对误差小于 5%，5.5% 的数据相对误差介于 5%~10%，3.3% 的数据相对误差介于 10%~20%，而仅有 0.6% 的数据相对误差大于 20%。此外，图 8(b) 显示样本集中分布在对角线上，其决定系数 R^2 为 0.995 7，均方根误差为 0.033 2。由此可见，该网络模型在正六边形孔阵上展现出良好的普适性。

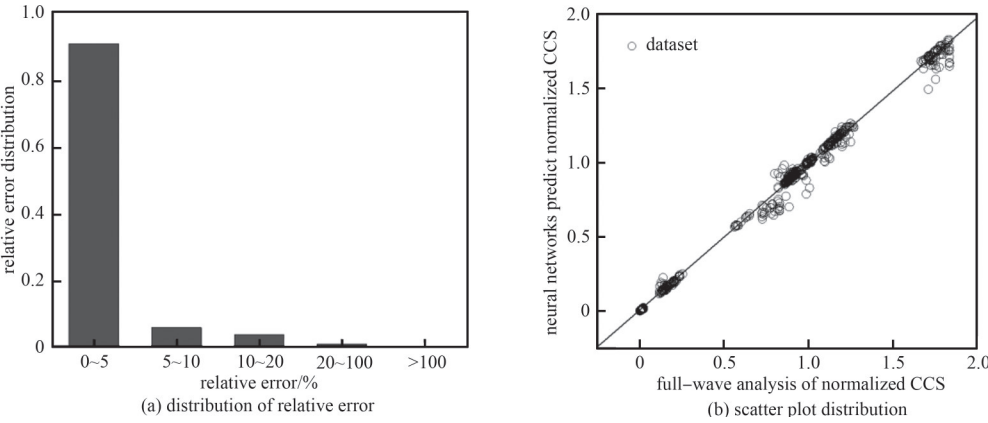


Fig.8 Prediction accuracy distribution of universal samples
图 8 普适性样本的预测精确度分布

4 双级模型在圆孔阵和方孔阵的迁移

为进一步分析该模型在不同单元形状孔阵上预测单孔与孔阵耦合特性的普适性效果，将双级模型二的第二级网络直接迁移到圆孔阵和方孔阵的 CCS 预测中。针对不同单元形状孔阵，建立双级模型二的第一级网络，结合迁移的第二级网络，预测孔阵归一化 CCS。由全波分析法分别计算出圆孔阵和方孔阵的 2 800 组数据，并与上述建立的神经网络模型预测结果进行比较，其相对误差分布如图 9 所示。约有 90% 的圆孔阵和方孔阵数据相对误差小于 5%，经分析得两种孔阵样本数据的平均相对误差均为 1.94%。根据所显示的相对误差概率分布，验证了模型迁移的有效性。此外，采用均方根误差和决定系数对以上数据预测精确度进行评估。圆孔阵和方孔阵的均方根误差分别为 0.031 9 和 0.029 0，决定系数分别为 0.995 2 和 0.995 5，表明该双级模型的第二级网络适用于其他单元形状孔阵由单孔归一化 CCS 预测其孔阵归一化 CCS 的应用。

5 结论

本文提出了针对预测孔阵归一化 CCS 的 3 种结构的神经网络模型。在已有的对孔阵归一化 CCS 影响因素的探究基础上,补充分析了平面波方位角因素,以构建影响因素更为全面的神经网络模型。以正六边形孔阵为例,比较了 3 种模型的准确性。结果表明,双级模型二具有最高的预测精确度和较高的效率,因此选择双级模型二作为最优模型,并证实了该模型的第二级网络在预测正六边形孔阵及其他形状孔阵 CCS 的普适性。这一研究对快速预测 CCS 在分析和优化与孔缝穿透相关的电磁干扰问题方面具有重要意义。此外,本文引入更多先验信息实现神经网络模型从黑箱到灰箱转换的方法,为其他领域提供了有价值的参考和启发。

参考文献:

- [1] 王建国. 高功率微波脉冲孔缝耦合的理论和数值模拟研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 1997. (WANG Jianguo. Theoretical and numerical simulation study on high-power microwave pulse aperture coupling[D]. Xi'an, China: Xidian University, 1997.)
- [2] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1605–1613. (LIU Shanghe, LIU Weidong. Research progress on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1605–1613.) doi:10.13336/j.1003-6520.hve.2014.06.001.
- [3] 陈宗胜, 李志刚. 开口金属腔体对强电磁脉冲的耦合效应[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 18–23. (CHEN Zongsheng, LI Zhigang. Coupling effects of open metal cavity on intense electromagnetic pulses[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(1): 18–23.) doi:CNKI:SUN:GFKJ.0.2020-01-003.
- [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. doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6930897.
- [5] CHO Y K, SON H W, CHOI J Y. Transmission resonance through small apertures[C]// 2012 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, 2012: 1–3. doi:10.1109/ANTEM.2012.6262311.
- [6] ROBINSON M P, CLEGG J, MARVIN A C. Radio frequency electromagnetic fields in large conducting enclosures: effects of apertures and human bodies on propagation and field-statistics[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006, 48(2): 304–310. doi:10.1109/TEMC.2006.873856.
- [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 & Applied Mathematics, 1950(3): 355–393. doi:10.1002/cpa.3160030403.
- [8] ANDERSSON T. Moment-method calculations on apertures using basis singular functions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(12): 1709–1716. doi:10.1109/8.273329.
- [9] 周金山, 刘国治, 彭鹏, 等. 不同形状孔缝微波耦合的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(1): 88–90. (ZHOU Jinshan, LIU Guozhi, PENG Peng, et al. Experimental Study on Microwave Coupling of Apertures with Different Shapes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(1): 88–90.)
- [10] 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. Singapore: IEEE, 2012: 677–680. doi: 10.1109/APEMC.2012.6237888.
- [11] 祝磊, 刘强, 赵翔, 等. 基于 BP 神经网络的圆形孔缝 CCS 预测[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(3): 26–30. (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(3): 26–30.) doi:10.11884/HPLPB201931.190011.
- [12] 丁星丽, 赵翔, 闫丽萍, 等. 基于神经网络的圆孔阵列垂直入射 CCS 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.) doi:CNKI:SUN:WXDG.0.2020-05-009.
- [13] 贺智彬, 闫丽萍, 赵翔. 基于 BP 神经网络的六边形孔阵 CCS 的预测[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(5): 118–125. (HE Zhibin, YAN Liping, ZHAO Xiang. Prediction of coupling cross section of hexagonal aperture array based on BP neural network[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(5): 118–125.) doi:10.11884/HPLPB202234.210566.

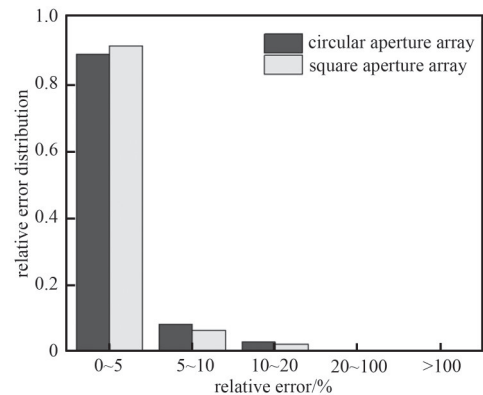


Fig.9 The relative error distribution of circular aperture array and square aperture array

图9 圆孔阵和方孔阵的相对误差分布

- [14] GUNNARSSON R, BÄCKSTRÖM M. Transmission cross section for apertures and arrays calculated using time-domain simulations[C]// International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Gothenburg, Sweden: IEEE, 2014: 169–174. doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6930897.
- [15] GUNNARSSON R, BÄCKSTRÖM M. A heuristic model for the transmission cross section of wire-mesh covered apertures[C]// 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility—EMC 2015. Dresden, Germany: IEEE, 2015. doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256209.
- [16] 贺智彬. 六边形孔缝阵列 CCS 的神经网络建模及方法改进[D]. 成都: 四川大学, 2022. (HE Zhibin. Neural network modeling and method improvement for coupled cross-sections of hexagonal aperture arrays[D]. Chengdu, China: Sichuan University, 2022.)
- [17] YU Dapeng, SONG Hang, LIU Yinggang. Estimate of shielding efficiency for double layer enclosure with apertures array[C]// 2008 the 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Kunming, China: IEEE, 2008: 446–449. doi: 10.1109/ISAPE.2008.4735244.
- [18] 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. doi: 10.1109/15.784155.
- [19] 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 pulse with cavity array and cavity with dielectric window[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2007.)

作者简介:

王 婕(2000–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为计算电磁场与电磁兼容 .email: 2477998062@qq.com.

赵 翔(1973–), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁兼容分析与电磁效应评估.

闫丽萍(1972–), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁兼容分析与电磁效应评估.