

# 基于仿真及神经网络的大型电磁脉冲模拟器 近区场计算

张金颢, 周 恒, 张守龙, 蒋廷勇, 王胜涛, 刘 真

(西北核技术研究所, 陕西西安 710069)

**摘 要:** 本文针对大型电磁脉冲模拟器试验区域电场分布测量, 设计了一种基于传递函数的近区场波形预估方法. 该方法使用全波仿真获取初始传递函数, 研究了基于频域数据的神经网络训练方法, 建立了可以计算特定区域任意测点传递函数的神经网络模型. 利用两套测量系统同时进行测量验证, 结果表明: 在  $40\text{ m}\times 40\text{ m}\times 10\text{ m}$  的范围内, 该计算方法可以基于单一测点的实测结果计算任意点的电场波形, 且基于该方法计算的电场波形与实测波形主波幅值差异均小于 3%, 实测验证波形结果与预估结果基本一致. 文中方法在满足试验区域为线性时不变 (Linear Time Invariant, LTI) 系统的情况下, 可以应用于大型电磁脉冲模拟器的近区场快速预估计算.

**关键词:** 大型电磁脉冲模拟器; 传递函数; 神经网络模型; 快速预估; 电场测量

**中图分类号:** TM835; TM931 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)03-0712-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20211137

## Calculation of Near-Field of Large-Scale Electromagnetic Pulse Simulator Based on Simulation and Neural Network

ZHANG Jin-hao, ZHOU Heng, ZHANG Shou-long, JIANG Ting-yong, WANG Sheng-tao, LIU Zhen

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

**Abstract:** Aiming at the large-scale electromagnetic pulse simulator, this paper designs a near-field waveform calculation method based on the transfer function. This paper uses full-wave simulation to obtain the initial transfer function, studies the neural network training method based on frequency domain data, and establishes a transfer function neural network model that can calculate any measurement point in a specific area. The results of simultaneous measurement using two sets of measurement systems show that within a range of  $40\text{ m}\times 40\text{ m}\times 10\text{ m}$ , this calculation method can calculate the electric field waveform at any point based on the actual measurement result of a single measurement point. The difference between the electric field waveform calculated based on this method and the measured waveform amplitude is less than 3%, so the measured verification results are consistent with the theory. In the case where the method meets the area as a linear time invariant system, the method can be applied to a near-field fast calculation of a large-scale electromagnetic pulse simulator.

**Key words:** large-scale electromagnetic pulse simulator; transfer function; neural network model; fast estimation; electric field measurement

### 1 引言

近年来, 国内外高度重视高空核电磁脉冲 (High Altitude Electromagnetic Pulse, HEMP) 对骨干电力网络、信息网络和国防装备所构成的电磁安全威胁<sup>[1-3]</sup>. 受大型系统耦合结构的复杂性、分系统测试的局限性、建模仿真的精确性等影响, 基于大型 HEMP 模拟器开展电磁易损性考核试验仍是评估装备全系统强电磁环境适应性最可信的手段<sup>[4]</sup>, 为此国内外建设了多个大型

HEMP 模拟器, 尺寸达到数十至百米量级<sup>[5]</sup>.

辐射场测量作为获取电磁易损性考核中试验区域电磁脉冲参数重要试验手段, 既担负了验证模拟装置复现电磁脉冲环境真实性的功能, 同时也为系统电磁环境效应评估提供了重要的数据<sup>[6]</sup>. 由于地面传播环境影响, 现有 HEMP 模拟器试验区域的辐射场随空间位置分布复杂, 不同位置处辐射场波形参数各不相同, 在垂直高度数米范围内脉冲波形和幅度即可产生明显变化, 导致试验区域内待试系统各部位入射电场波形各不相同,

进而也使该处的耦合特征参数产生显著差异. 因此, 从系统电磁环境效应角度而言, 获取试验区域内准确、完备和详细的辐射场分布特征对于试验评估是十分必要的. 但是, 对于尺寸超过数十米的大型复杂系统而言, 所涉及敏感部位在数十至百余个, 所要求的测量系统数量将极为庞大. 因此, 以测量获取试验区辐射场分布的方法耗费巨大、系统复杂, 且基于测量数据绘制的试验区三维辐射场分布在灵敏度和空间分辨率方面也难以满足试验苛刻要求. 事实上, 大尺寸区域电磁脉冲辐射场分布三维精确测量也是美军 2018 年公布的未来大型装备 HEMP 试验评估需解决的 5 大关键技术之一<sup>[7]</sup>.

全波仿真也是除测量手段外获取模拟器辐射场分布特征的方法之一, 近年来 Rakesh、朱湘琴、段泽民等在大型模拟器辐射场分布研究中, 通过导入国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 推荐 HEMP 波形作为激励源<sup>[8]</sup>, 给出了多种极化下大型模拟器试验区域电场分布特征<sup>[9-11]</sup>. 但在实际场景中, 由于很难准确测得模拟器馈电点处峰值电压为 MV 级的激励信号波形, 使得计算数据与实测数据之间存在较大差异, 单纯依靠仿真手段无法准确获得试验区辐射场分布特征. 不仅如此, 由于全波仿真模型的网格数量达到数十亿量级, 一旦出现新的计算请求时通常无法复用现有仿真结果, 而重新计算时则带来计算资源耗费高、仿真时间长等问题.

人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 技术近年来得到快速发展, ANN 应用的重要方向是通过网络模型训练以提高计算结果的复用性, 从而加快优化设计速度. 近年来, ANN 在射频和微波计算机辅助设计等领域也有应用<sup>[12-14]</sup>, 有效提高了器件电磁仿真数据复用性, 提升了仿真效率. 在辐射场三维分布预估领域, 从目前公开文献来看尚未见到类似应用. 由此, 针对大型模拟器效应试验中, 如何综合利用测量、仿真和人工智能等多种方法, 以有效解决大区域范围三维辐射场分布特征精确预估难题, 是当前电磁环境效应研究工作中碰到的全新挑战.

本文提出了一种综合利用全波仿真、神经网络和实测数据等构建试验区电场分布特征的预估方法, 在仅借助于单个测量系统实测数据情况下, 利用全波仿真和神经网络方法推导得到的传递函数, 计算试验区域任意点处的辐照参数. 实测结果表明, 基于该方法所得预估波形与该点测量波形吻合较好, 从而验证了方法的有效性, 为后续大型电磁脉冲模拟器试验评估提供有力手段.

## 2 模拟器试验区域电磁传播分析

水平极化核电磁脉冲模拟器是一种典型大型电磁脉冲模拟器, 由双锥天线、圆柱笼形天线和末端负载等

构成, 具体如图 1 所示. 通常而言, 该模拟器通常架设于地面上一定高度位置处, 脉冲源产生对应的核电磁脉冲并通过天线辐射出去, 以模拟高空核爆炸产生的电磁脉冲对地面系统的辐照效应.

通过分析可知, 该类试验场景主要涉及到金属、空气与土壤介质, 且不会在短时间内产生变化, 可以视作一个线性时不变 (Linear Time Invariant, LTI) 系统, 可利用传递函数描述该类 LTI 系统中某 d1 和 d2 两个点位的电磁关系<sup>[10]</sup>. 模拟器近区电场分布特征预估的基本原理也是基于已知点实测数据 (如 d1 点), 利用该类 LTI 系统中某两点 (如 d1 和 d2) 之间传递函数不变特性, 实现对另一点 (如 d2 点) 波形的预估, 在具体实现上涉及两个关键步骤:

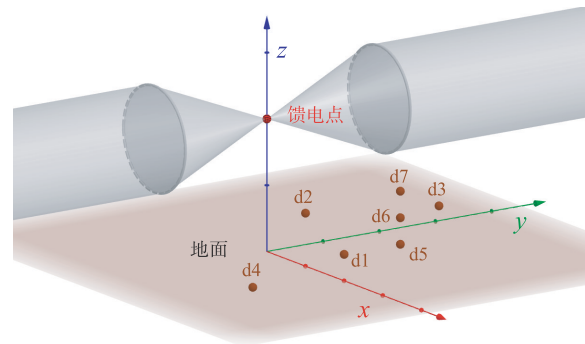


图 1 试验场景示意图

首先, 在给定试验场景下计算获取不同位置之间传递函数  $T(\omega)$ . 考虑到在核电磁脉冲试验中不同点场强数据通常采用时域波形描述, 记为  $E_{d1}(t)$  和  $E_{d2}(t)$ , 而传递函数通常在频域定义. 因此, 不同位置之间传递函数  $T(\omega)$  采用下式计算:

$$T_{d2-d1}(\omega) = \frac{FT(E_{d2}(t))}{FT(E_{d1}(t))} \quad (1)$$

$E_{d1}(t)$  表示 d1 测点处的电场时域波形,  $E_{d2}(t)$  表示 d2 测点处的电场时域波形, FT 表示傅里叶变换 (Fourier Transform, FT).

其次, 在获得第  $m$  次试验中已知点波形  $E_{d1}^m(t)$  情况下, 通过波形数据反变换获得预估点对应第  $m$  次试验下该点波形, 该过程中涉及到对测量波形和传递函数的两次变换, 具体公式如下:

$$E_{d2}^m(t) = \text{IFT}(T_{d2-d1}(\omega) \times \text{FT}(E_{d1}^m(t))) \quad (2)$$

IFT 表示傅里叶逆变换 (Inverse Fourier Transform, IFT), 考虑到试验场景对应不同点位之间可视为 LTI 系统, 这意味着在频域定义的传递函数  $T(\omega)$  仅由两点之间传播边界决定, 式 (2) 中  $E_{d1}^m(t)$  波形特征并不会对传递函数本身造成任何影响. 因此,  $E_{d1}^m(t)$  波形既可以是理想的激励波形, 也可以是实测波形.

模拟器近区场波形预估的关键在于解决传递函数的准确获取,在具体实现途径上有两种:

一是通过实测方法获取不同点位之间的传递函数.这种方法的优点在于测量过程本身是在实际传播边界下进行,因此计算得到的传递函数结果最为可信.不足之处在于测量波形包含测量系统本身响应特性,为获取准确传递函数计算结果,需要不同系

统之间具有高度一致的响应特性.不仅如此,模拟器近区范围达数十米,为获取近区不同点位间完整的传递函数,所需测量数据非常庞大,在实际操作中并不可行.

二是通过全波仿真和神经网络方法同样也可以获取不同点位之间的传递函数.

模拟器近区场波形预估流程如图2所示.

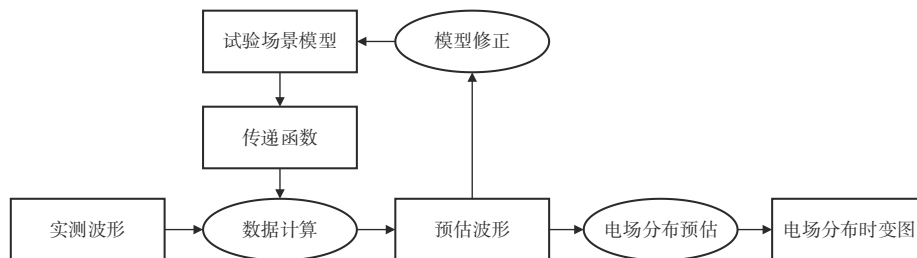


图2 模拟器近区场波形预估流程图

### 3 基于全波仿真和神经网络的传递函数计算

准确的传递函数计算是实现波形预估的关键,通过全波仿真的方法能够在一次计算中获得试验区域内预设点位波形,从而以此快速方便地计算对应两点间传递函数.相比于实测方法,全波仿真方法排除了测量系统一致性和方向性等影响,通过一次仿真计算即可获得不同点位间传递函数,有效节省了成本和时间,但基于该方法计算传递函数时需考虑以下两个方面问题.

问题1,数值模型与真实模型间一致性,这是影响传递函数进而决定电场预估结果可信度的重要因素.减少数值模型和真实模型之间偏差的关键在于将大型模拟器施工和架设误差影响考虑到建模中,基于实测电场波形反复进行数值模型迭代修正,不断趋近于真实模型,最终得到高置信度的数值计算模型.

问题2,计算资源的有限性和预估点位的不确定性.模拟器全尺寸数值建模属电大尺寸问题,网格划分数量达到10亿量级,即使按照空间间隔1m的步长,用于计算传递函数的点位数量在数千个,所需储存空间达到数十GB.考虑到待试系统的多样性,各系统的敏感点位很有可能并不恰好位于数值模型中的预设点位,采用邻近预设点位的传递函数计算结果预估敏感点位时将带来误差.重新计算则将会再次耗费巨大的计算资源和时间成本,无法满足快速准确的试验结果评判要求.

针对问题1,文中在模拟器数值建模过程中已经将地面等传播环境纳入至模型,并在数值模型预设点位处开展电场波形参数测量,通过实测数据不断修正数

值模型的参数设置,从而构建较为真实的HEMP模拟器数值模型;针对问题2,采用ANN建立了试验区域传递函数的神经网络模型,该模型通过对全波仿真获得的监测点数据进行训练,可输出任意点位间的传递函数,从而实现对试验区电场波形的预估.

#### 3.1 基于全波仿真模型的传递函数计算

水平极化核电磁脉冲模拟器近场区域全波仿真模型如图1所示,该模型主要由辐射天线和地面两部分组成,馈电点位于双锥传输线顶点,馈电脉冲波形参考了IEC制定的IEC 61000-2-9标准<sup>[15]</sup>.此外,地面是影响HEMP模拟器周边电场波形的主要因素,这是由于HEMP在传播至地面后会产生反射,反射后脉冲与主脉冲叠加后会改变原有电场波形及幅度,根据前期实测结果将地面相对介电常数设置为10,电导率设置为0.015 S/m,表面形状则根据实际情况设置为平整表面.

根据实际的试验区域,为减少计算时间和存储空间,在 $x$ 和 $y$ 方向上 $[0\text{ m}, 20\text{ m}]$ 的范围内按2 m步长、在 $z$ 方向上 $[0\text{ m}, 10\text{ m}]$ 的范围内按1 m步长共设置1210个预设点场探针,并结合计算对称面的设置,将 $x$ 和 $y$ 方向分别拓展至 $[-20\text{ m}, 20\text{ m}]$ 的计算范围.由于两个场探针之间的传递函数只受该模型中电磁边界条件影响,与具体激励波形无关,因此,本文选取快前沿类高斯脉冲作为激励波形,易于分析地面反射波形到来的时间与幅值.本文采用CST微波工作室时域求解器进行计算,网格划分数量约为10亿个,使用联想P900工作站单次运行时间为8 h.

#### 3.2 基于频域数据的神经网络模型训练

由于全波仿真仅计算预设点场探针位置处的电场波形,本文利用神经网络模型对仿真的数据进行训练,

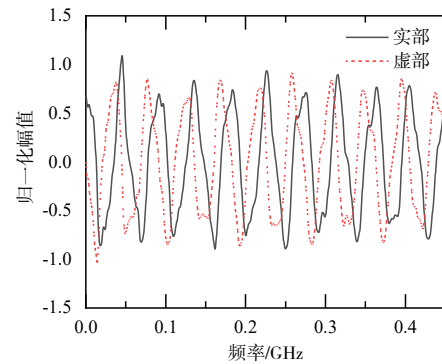
在训练完成后,只需输入目标点的位置信息,即可由神经网络模型快速计算获取该点的电场波形.根据该问题特征,选取适用于拟合类的BP神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)作为训练模型.为防止神经网络训练过拟合,本文将数据划分为三份,利用70%的数据构建训练集,15%的数据构建验证集,以及15%的训练数据构建测试集,当验证集均方误差(Mean Square Error, MSE)保持6代无下降时,停止训练.

在神经网络的训练中,训练数据的选取是影响模型训练质量的重要因素.在该问题中,若使用时域数据,虽波形较为直观,但数据之间存在因果性,对应需要选取较为复杂的神经网络模型去训练;若使用频域数据,各频点之间的数据互相独立,对于神经网络训练有更大优势.在全波仿真中,可以获得激励波形,因此可以计算出模拟器馈电点(feed点)处到各预设点场探针(d点)之间的传递函数 $T_{d\text{-feed}}(\omega)$ ,并以此作为训练数据,使得神经网络的训练结果仅受LTI系统边界影响,而与仿真激励波形无关.而d1和d2两点之间传递函数 $T_{d2\text{-d1}}(\omega)$ 由下式给出:

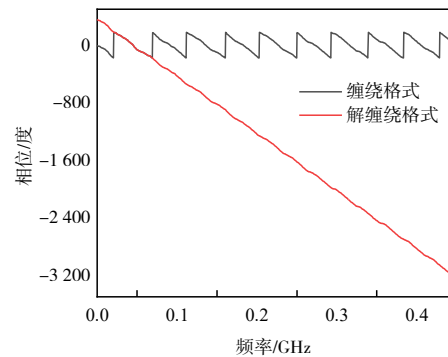
$$T_{d2\text{-d1}}(\omega) = \frac{T_{d2\text{-feed}}(\omega)}{T_{d1\text{-feed}}(\omega)} \quad (3)$$

在构建神经网络时,可用场探针数据序列直接构建神经网络,或以随机从序列中抽取的频点数据构建神经网络.在直接对序列构建神经网络的时候,由于输出层的神经单元数量对应输出数据的长度,因此构建的神经网络计算量十分巨大,必须对频域数据进行采样处理,导致训练结果的精度下降,难以应用更复杂的神经网络模型.并且在实际测试中,对序列构建的神经网络在训练相位数据时因MSE无法下降而提前停止.而随机抽取频点数据的构建神经网络虽然输入变量增加了,提升了神经网络训练难度,但整体上降低了神经网络的规模,使训练更加可行.另外,由于频域数据是以复数形式进行描述,但从频域数据的实部虚部及缠绕(wrap)格式相位的数据形式来看,都在频域上表现出类似周期性的特性,以这样的数据作为标签大大增加了神经网络的训练难度,容易导致神经网络训练时难以收敛.因此需选用幅值与解缠绕(unwrap)格式表达的相位信息作为标签进行神经网络的训练,如图3所示.

根据试验区域电磁脉冲传播特征,本文以球坐标系表示坐标信息,利用含4层隐藏层的BP神经网络进行训练,以训练完毕的神经网络计算馈电点到各场探针的传递函数 $T_{d\text{-feed}}(\omega)$ ,并基于馈电点处激励波形计算各个场探针处时域波形.如图4所示,以球坐标系坐标数据训练神经网络计算的时域波形与仿真结果一致,验证了本文所建神经网络模型的有效性.



(a) 实部与虚部曲线



(b) 相位曲线

图3 训练数据示意图

#### 4 基于实测结果的传递函数验证

为验证该方法的有效性,及模型与实际试验场景的一致性,本文利用两套自研测量系统对试验区域电场波形进行了测量.其中,测量系统3 dB带宽为2.8 GHz,接收天线为全向天线,且通过在相同测点处的背靠背测试验证,表明两套系统具有良好的一致性,测量系统对电磁脉冲的响应差异在传递函数计算过程中可忽略不计.

测量过程中,将1#测量系统固定放置于(15 m, 0 m, 10 m)处,如图5所示.2#测量系统被放置于多个波形考核点位进行测量,通过将预估方法给出的波形与实测波形进行比对分析,不断对数值模型中双锥天线倾斜角、同心度等参数进行修正.图6则给出了数值模型改进前后在d3点(15 m, 5 m, 6 m)预估结果与实测结果比较,可以看出,通过不断修正数值模型,预估结果不断趋近实测波形.

待数值模型修正完善后,利用在预设点位处场探针数据计算传递函数,该数据被用于训练并最终得到了用于该模拟器电场预估的神经网络.为验证基于仿真和神经网络的大型电磁脉冲模拟器电场预估方法,先后在试验区域内选定了7个测点,其分布具体如图1

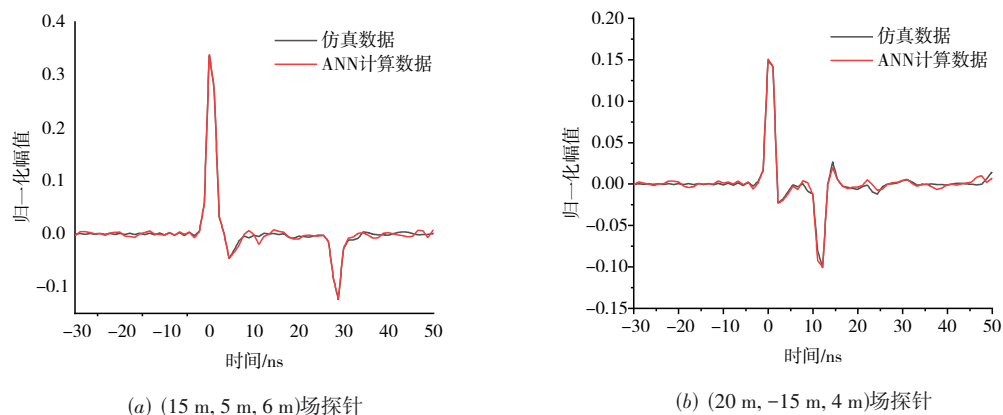


图4 神经网络计算结果与仿真波形对比图



图5 测量系统架设图

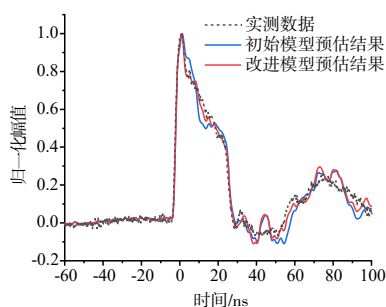


图6 (15 m, 5 m, 6 m)点处模型改进结果比较图

所示. 从测点分布来看, d1 和 d2 点位于模拟器中垂面, 除 d4 点外其余点位主要分布于模拟器中垂面北侧. 不仅如此, 在测点高度选择上, 特别选择了 d5、d6 和 d7 三

个点, 其在地面投影位置相同, 但高度分别为 2 m、4 m 和 6 m. 通过上述点位分别验证了本文所提出方法在预估点是否在中垂面、预估点不同高度、预估点与馈电点不同距离时的预估方法有效性.

实际预估电场归一化结果如表 1 和图 7 所示. 可以看出, 预估波形与实测波形吻合良好, 半高宽和幅值差异均小于 3%, 上升沿时间差异小于 10%. 由于预估方法验证试验中模拟器进行了不同加压, 该情况下模拟器输出脉冲波形特征也相应会出现变化, 因此试验结果也证明了预估方法在面对不同入射波形下, 同样可以准确可靠地实现试验区域内电场参数准确预估.

相比于单一的全尺寸仿真计算, 基于数值仿真和神经网络联合的传递函数计算效率得到大幅提高, 当需要新增不同点位传递函数计算时, 可由全波仿真的 8 小时降低至毫秒量级. 在此基础上, 本文利用该预估方法并结合单点实测数据, 对模拟器 40 m×40 m×10 m 试验区域内电场分布特征进行预估, 图 8 为在  $z=10$  m 剖面区域内共计  $1.6 \times 10^4$  个点位波形预估结果, 预估计算时间为 118 s, 图 8(a) 为  $t_0$  时刻电场分布的预估结果, 图 8(b)~(d) 分别给出了  $t_1=t_0+10$ (ns)、 $t_2=t_0+20$ (ns)、 $t_3=t_0+30$ (ns) 时刻电场分布的预估结果. 可以看出, 通过将电场预估结果与延迟时间进行关联, 本文提出的预估方法同时绘制给出了模拟器输出电磁脉冲在自由空间传播与地面反射等复杂过

表1 神经网络计算波形与实测波形参数对比

对比位置	上升沿			半高宽			幅值
	实测波形/ns	计算波形/ns	误差/%	实测波形/ns	计算波形/ns	误差/%	误差/%
d1(10 m, 0 m, 2 m)	2.93	2.94	0.34	10.71	10.67	-0.37	0.60
d2(5 m, 0 m, 4 m)	3.19	2.87	-10.00	23.35	23.33	-0.09	2.16
d3(15 m, 5 m, 6 m)	3.21	2.95	-8.10	21.15	21.23	0.38	-1.27
d4(20 m, -15 m, 4 m)	2.22	2.41	8.56	10.92	11.05	1.19	-0.45
d5(10 m, 5 m, 2 m)	2.84	2.87	1.06	9.79	10.03	2.45	-1.77
d6(10 m, 5 m, 4 m)	2.81	2.83	0.71	18.12	17.88	-1.32	2.92
d7(10 m, 5 m, 6 m)	2.85	2.87	0.70	21.13	20.81	-1.51	-1.47

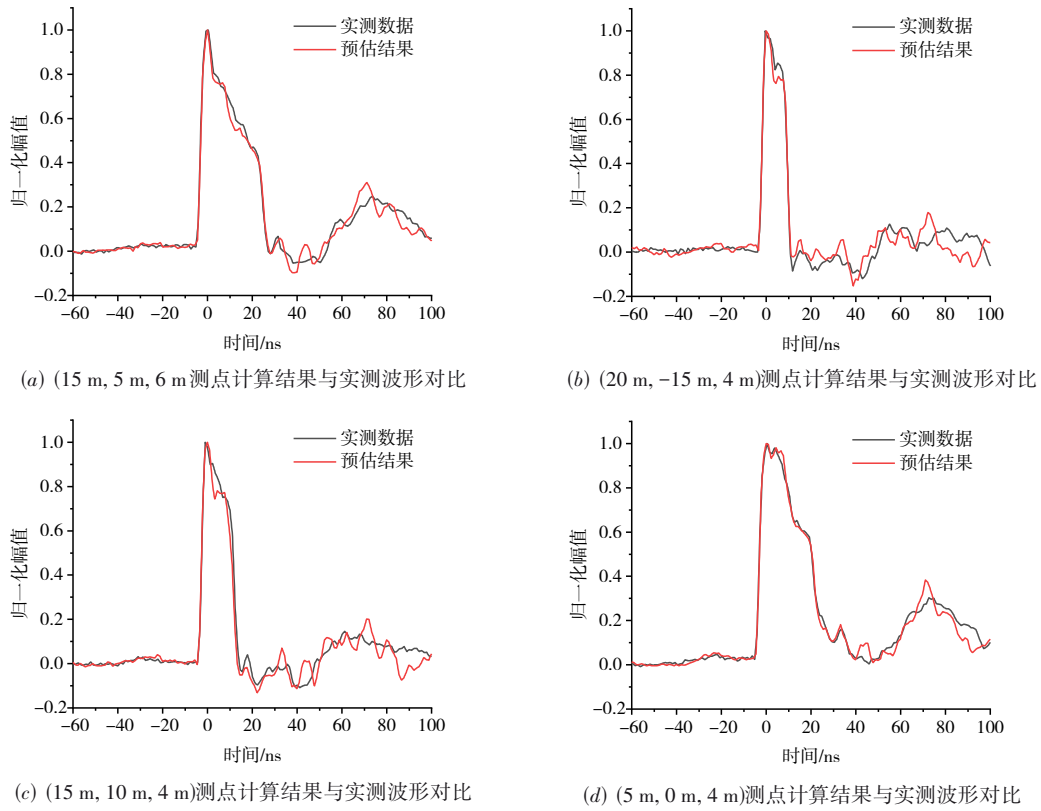


图7 神经网络计算结果与实测电场波形对比图

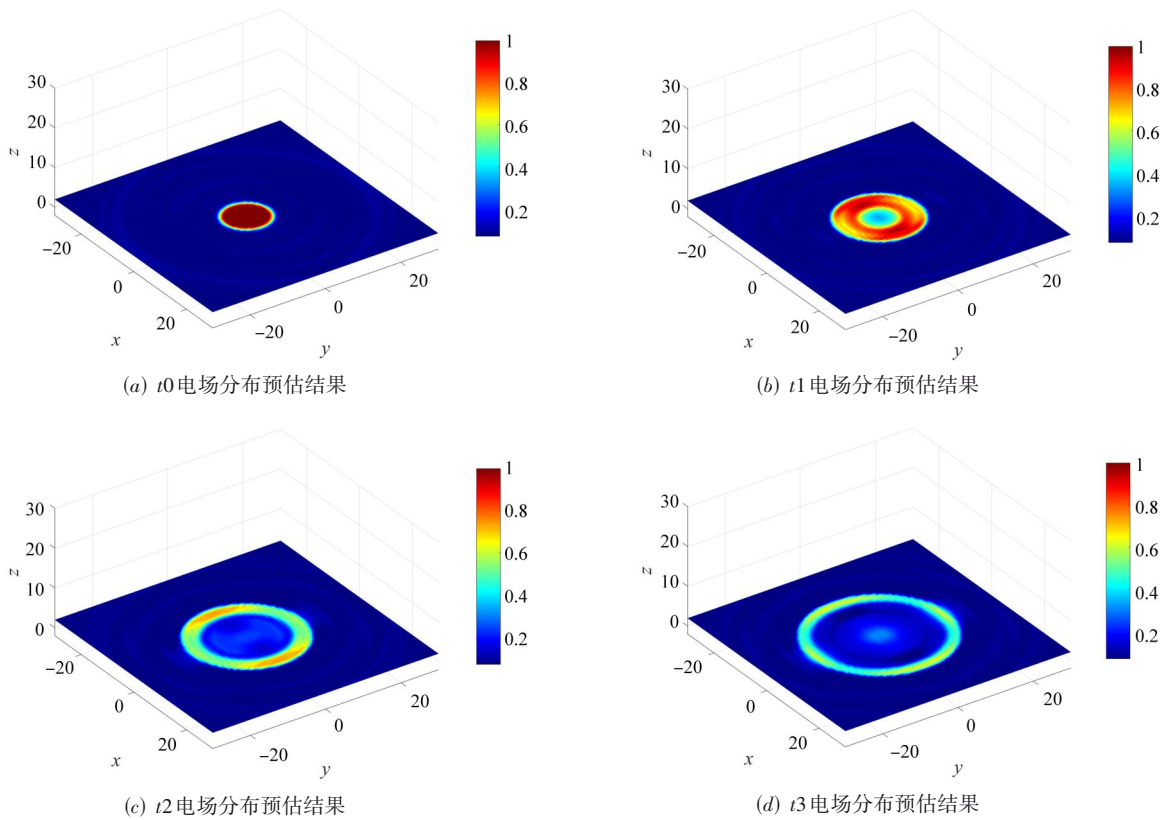


图8 试验区域电场分布时变图

程,为揭示不同高度、不同点位处 HEMP 电场与被考核系统的复杂电磁耦合过程提供了准确可信依据.同时,依据被考核系统电磁敏感部位处对应的电场波形,预估结果也为系统效应分析与结果复现提供了数据支持.

为验证本文所提出方法的适用性,图9给出了已知点波形为双极高斯脉冲情况时,预估点计算波形.可以看出,在本文所阐述的 LTI 系统中不同点位间的传递函数是在频域定义,其特征主要与传播场景边界条件决

定,而与点位具体波形形状本身并没有关系.但是,在预估过程中需要结合测点具体波形频谱范围,适当调整传递函数的频域计算范围,从而达到降低计算量、提高计算效率之目的.不仅如此,通过更换对应目标的全波仿真模型,本文提出的方法同样也可适用于大型天线阵列近场或建筑物内部场等预估,具有较强普适性,为解决类似大尺寸范围辐射场三维分布精确测绘提供了很好的技术途径.

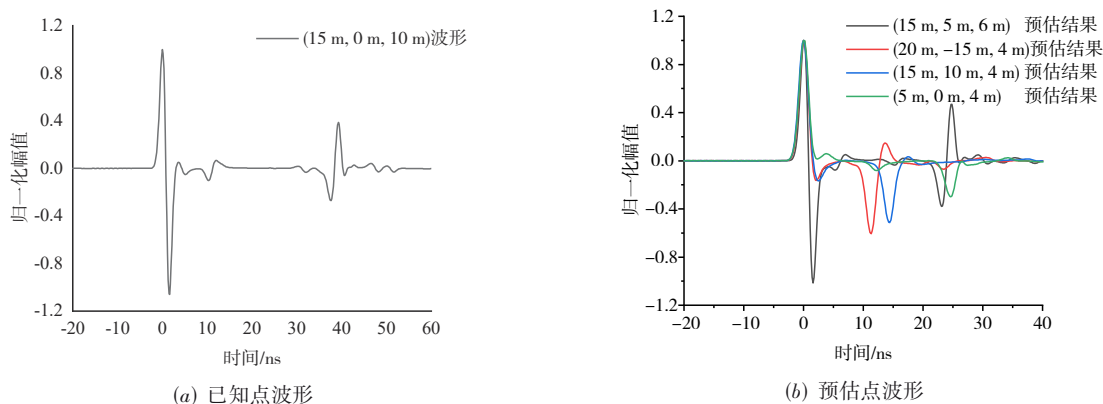


图9 双极高斯脉冲预估结果

## 5 结论

本文针对大型 HEMP 模拟器考核试验效应分析与评估需求,基于数值仿真和神经网络提出了一种利用单点实测数据并结合传递函数快速预估试验区全域电场波形的方法.传递函数的准确获取是实现波形快速预估计算的关键,针对该问题文中建立了全尺寸模拟器数值模型,通过实测数据不断迭代改善了模型精度,在此基础上采用全波仿真数据训练神经网络作为代理模型,从而能够快速得出试验区域不同点位之间准确的电场传递函数.利用该电场传递函数计算结果,并基于单点实测数据预估了试验区域目标点电场波形,在节约试验现场成本的同时极大提升了试验效率,为试验评估提供了更为全面的数据支持.

在其他 LTI 系统,尤其是大型试验考核环境中,也可利用该方法建立系统的代理模型实现大区域辐射场三维分布精确测绘.在传播环境结构较为简单时,可利用本文提出的神经网络训练方法替代仿真模型计算传递函数,且在电磁领域中,该神经网络构建方法对类似的神经网络训练具有很强的参考价值.同时,后续还可结合强化学习等技术,通过实测数据循环迭代不断提高数值模型的精确度,达到预估模型自适应修正目的,进一步提高预估方法的计算效率和结果准确性.

## 参考文献

- [1] 秦锋,毛从光,崔志同,等. HEMP 传导环境下变压器等效电路模型的建立及验证[J]. 现代应用物理, 2021, 12(2): 39-44.  
QIN F, MAO C G, CUI Z T, et al. Design and verification of equivalent circuit model of transformer under HEMP conduction environment[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(2): 39-44. (in Chinese)
- [2] 赵墨,吴伟,李进玺,等. 典型无人机飞行控制系统 HEMP 效应研究[J]. 现代应用物理, 2018, 9(1): 71-74, 81.  
ZHAO M, WU W, LI J X, et al. Effect of high altitude electromagnetic pulse on flight control system of typical UAV[J]. Modern Applied Physics, 2018, 9(1): 71-74, 81. (in Chinese)
- [3] 鲍永波,田杨萌,王彩霞,等. 核电磁脉冲与开孔金属腔体耦合特性研究[J]. 微波学报, 2017, 33(6): 75-80.  
BAO Y B, TIAN Y M, WANG C X, et al. Research on the characteristics of the NEMP coupling into a metallic cavity with apertures[J]. Journal of Microwaves, 2017, 33(6): 75-80. (in Chinese)
- [4] 陈亚洲,张冬晓,田庆民,等. 某型无人机数据链系统 HEMP 辐照效应[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 959-965.  
CHEN Y Z, ZHANG D X, TIAN Q M, et al. HEMP radiation effects on unmanned aerial vehicle data link system

- [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 959-965. (in Chinese)
- [5] IEC. Electromagnetic compatibility(EMC): Part 4-32: Testing and measurement techniques HEMP simulator compendium: IEC 61000-4-32[S]. [2021-05-02]. <https://www.ccsn.net.cn/cssn/productDetail/45e5ceeb684d32fe54d3f3f3be99e3594>.
- [6] 王伟, 朱志臻, 聂鑫, 等. 一种高空核电电磁脉冲磁场测量技术[J]. 电波科学学报, 2019, 34(3): 347-354.  
WANG W, ZHU Z Z, NIE X, et al. A magnetic field measurement technology of high altitude electromagnetic pulse [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2019, 34(3): 347-354. (in Chinese)
- [7] Department of the Army. Request for information-high altitude electromagnetic pulse (HEMP) evaluations[EB/OL]. (2018-12-06). <https://www.governmentcontracts.us/government-contracts/opportunity-details/NBD00159790694125454>.
- [8] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 周辉, 孙蓓云. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787.  
XIE Y Z, WANG Z J, WANG Q S, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: A review [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787. (in Chinese)
- [9] 朱湘琴, 王建国, 蔡利兵, 等. 辐射波电磁脉冲模拟器笼形天线辐射特性的并行计算[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1597-1601.  
ZHU X Q, WANG J G, CAI L B, et al. Parallel computation for radiation characteristics of cage antenna of radiating-wave EMP simulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1597-1601. (in Chinese)
- [10] 朱湘琴, 王建国, 陈维青, 等. 垂直极化平行板有界波电磁脉冲模拟器辐射近场的快速估算方法[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(11): 244-250.  
ZHU X Q, WANG J G, CHEN W Q, et al. Method of fast estimating radiation near-field of flat-plate bounded wave electromagnetic pulse simulator with vertical polarization [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(11): 244-250. (in Chinese)
- [11] KICHOULIYA R, THOMAS M J. Radiation pattern of a hybrid type high altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator[C]//2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway: IEEE, 2016: 530-535.
- [12] 孙明峰, 杨阳, 朱铎丞, 等. 一种基于神经网络的复介电常数测量装置[J]. 真空电子技术, 2021, (2): 29-33.  
SUN M F, YANG Y, ZHU H C, et al. A complex permittivity measuring device based on neural network[J]. Vacuum Electronics, 2021, (2): 29-33. (in Chinese)
- [13] 洪畅, 邵维. 人工神经网络对耦合微带带通滤波器的建模[C]//2019年全国微波毫米波会议论文集(上册). 广州: 中国电子学会, 2019: 581-583.
- [14] GU Y J, HAO R, LI E P. Independent bifocal metalens design based on deep learning algebra[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(8): 403-406.
- [15] IEC. Electromagnetic compatibility-Part 2: Environment-Section 9: Description of HEMP environment-radiated disturbance-basic EMC publication: IEC61000-2-9[S]. [2021-05-02]. <https://www.ccsn.net.cn/cssn/productDetail/3c1d3025aa0f7cc4fecad8a350c69701>.

#### 作者简介



**张金颢** 男, 1997年7月出生于四川省绵阳市. 现为西北核技术研究所助理工程师, 从事电磁仿真与瞬态电磁脉冲测量相关工作.  
E-mail: fengxueljc@163.com



**周恒** 男, 1982年7月出生于湖南省芷江县. 现为西北核技术研究所工程师, 从事瞬态电磁脉冲方面的研究.  
E-mail: zhouheng19820510@163.com

**张守龙** 男, 1990年6月出生于安徽合肥市. 现为西北核技术研究所工程师, 主要研究方向为瞬态电磁脉冲的测量与计量.  
E-mail: Hollyhoock15@126.com

**蒋廷勇** 男, 1982年7月出生于广西桂林市. 西北核技术研究所高级工程师, 博士, 主要研究方向为强电磁脉冲试验相关技术.  
E-mail: jty725@aliyun.com

**王胜涛** 男, 1980年12月出生于山东省乳山市. 现为西北核技术研究所工程师, 主要研究方向为现代通信技术和强电磁环境构建技术.  
E-mail: 233540068@qq.com

**刘真** 男, 1987年10月出生于湖南省娄底市. 现为西北核技术研究所工程师, 主要从事瞬态电磁脉冲技术相关工作.  
E-mail: 543253654@qq.com