

基于人工智能高效近场扫描的瞬态强电磁 干扰传导耦合路径可视化



杨振中^{1,2*}, 谢雨婷³, 许 潘^{1,2}, 邓帅荣^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院 微系统与太赫兹研究中心, 成都 610200; 2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 绵阳 621000;
3. 浙江大学 信息与电子工程学院, 杭州 310058)

摘要 在高压电子系统中, 瞬态强电磁干扰会通过空间辐射、传导耦合等方式影响低压控制区的正常工作, 在该工况下系统的电磁兼容问题较为突出。该文在时域电流测试与近场扫描结合的基础上, 提出了一种改进的人工智能近场扫描算法, 可实现强瞬态电磁干扰下传导耦合路径的高效可视化, 据此采取了相应的整改措施并解决了系统中的电磁干扰问题。与传统近场扫描方法相比, 该文提出的人工智能算法可大幅度提高测试效率。此外, 还分析了不同参数的选择对该人工智能算法稳定性的影响, 提出了一种自动停止扫描的判决标准, 该判决标准使人工智能近场扫描算法不需要人为干预, 从而具有更高的智能化与鲁棒性。

关键词 高压电子系统; 瞬态强电磁干扰; 近场扫描; 耦合路径; 人工智能近场扫描算法
中图分类号 TN97; TN99 **文献标志码** A **DOI** 10.12178/1001-0548.2023210

AI-Based Efficient Near-Field Scanning for Conductive Coupling Path Visualization Under High Transient Electromagnetic Interference

YANG Zhenzhong^{1,2*}, XIE Yuting³, XU Pan^{1,2}, and DENG Shuairong^{1,2}

(1. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China;
2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China;
3. College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract In high-voltage electronic systems, high transient electromagnetic interference will affect the low-voltage controlling system via space electromagnetic radiation or coupling interference conduction. Under such circumstances, the electromagnetic compatibility problem of the system is more prominent. Based on the combination of time-domain current measurement and near-field scanning, this paper proposes an improved Artificial Intelligence (AI) near-field scanning algorithm, which can efficiently visualize the conductive coupling paths under strong transient electromagnetic interference. Further, mitigation methods are used to solve the electromagnetic interference problem in the system. Compared to the conventional near-field scanning method, the proposed AI method significantly improves the measurement efficiency. Moreover, this paper analyzes the influence of different parameter choices on the stability of the AI method, and proposes an automatic stopping criterion for the AI near-field scanning process. The stopping criterion makes the AI near-field scanning process more intelligent and robust without human intervention.

Key words high-voltage electronic system; higher transient electromagnetic interference; near-field scanning; coupling path; artificial intelligence scanning algorithm

高压电子系统由负责不同功能的多器件组成, 包含升压部分、信号触发部分和放电部分, 是典型的高低电压混合系统。随着电压的增高, 瞬态强电磁干扰^[1]会影响低压控制区的正常工作, 导致触发电

路损坏或系统失效。目前, 针对瞬态电磁干扰的分析报道相对较少, 且大多是应用仿真建模^[2-4]对电磁干扰进行预测分析, 缺乏实际有效的测试手段对耦合路径进行验证^[5-6]。

收稿日期: 2023-08-24; 修回日期: 2023-12-24

基金项目: 国家自然科学基金 (U203020025)

作者简介: 杨振中, 主要从事微系统电磁方面的研究。

*通信作者 E-mail: yangzhenzhong_mtrc@caep.cn

传统时域电流测试方法是接触式探头直接接入待测位置,再通过示波器获取电流波形。对于高压系统,接触式电流测试存在一定的安全隐患且难以分析出实际的传导耦合路径。对此,近场扫描方法^[7]有望实现高压电子系统中时域瞬态电流的可视化。文献 [8-9] 将电场或磁场探头放置在走线上方,通过探头感应电压还原重构时域瞬态电流波形,验证了时域瞬态电流测试方法的可行性,但仅验证走线上单个位置处的电流测试,未进一步研究瞬态电流的传播过程。文献 [10-11] 将磁场探头与近场扫描技术相结合,通过对整个印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)进行扫描,还原静电放电发射期间电磁场的变化过程,但仅限于对电磁场的变化研究,没有深入至电流的耦合路径分析及提出相应的整改措施。

本文提出了一种适用于瞬态强电磁干扰下传导耦合路径的高效可视化方法,以瞬态电流重构方法为基础,采用基于人工智能(Artificial Intelligence, AI)的近场扫描算法,大幅度提升了测试效率。与文献 [12] 的工作相比,本文从工程化角度出发改善测试方法,去除系统中的强电磁辐射干扰,从而有效分离出传导电流,实现耦合路径的可视化,并据此提出抗干扰改进方案,提高高压电子系统的安全裕量。为了提升测试效率,在文献 [13] 基于主动学习的近场扫描算法基础上,本文提出适用于时域瞬态电流测试的 AI 近场扫描算法,通过在扫描过程中自适应识别电流分布位置,减少扫描点数和扫描时间。不仅如此,为了避免过多的人为干预且能自动决定合适的稀疏扫描点数,本文提出一种自动停止 AI 近场扫描的判决标准,并分析不同参数的选择对该判决标准鲁棒性的影响。实验结果证明所提出的 AI 近场扫描算法可实现传导耦合路径的高效率测试,且所提出的自动停止判决标准使该 AI 扫描算法具备更高的鲁棒性和智能化。

1 人工智能近场扫描算法

为实现瞬态强电磁干扰下传导电流的耦合路径分析,将时域电流重构与近场扫描方法结合可有效获取待测物上瞬态电流的扩散与分布^[10]。而传统近场扫描耗时漫长,需要通过 AI 近场扫描算法将扫描点集中在电流强分布位置,只利用少量扫描点的测试结果便能重构出准确的瞬态场分布。

1.1 时域电流重构与近场扫描

本文采取非接触式电流测试方法捕捉高压电子

系统中的瞬态强电磁干扰。电流重构方法一般采用时域重建法^[8]和频域重建法^[9],两者原理类似,前者是在时域上进行分析,后者是在频域上进行计算。本文采用频域重建法,定义探头感应电压与被测电流在频域上的转换关系为探头因子 PF(f),则有:

$$PF(f) = \frac{V(f)}{I(f)} \quad (1)$$

式中, $V(f)$ 为探头感应电压的频谱表达式; $I(f)$ 是时域电流的频谱表达式。时域电流的计算表达式为:

$$I(t) = \text{IFFT}\left(\frac{\text{FFT}(V(t))}{PF(f)}\right) \quad (2)$$

式中, $I(t)$ 为芯片管脚时域电流; $V(t)$ 为示波器测量的探头感应电压时域波形; FFT 表示傅里叶变换; IFFT 表示傅里叶逆变换。实际测试中探头因子通过探头校准获得^[14-15],因此可以通过非接触式电流测试方法获得瞬态电流的时域波形。

在实现单个测试点时域电流重构的基础上,结合近场扫描^[16-18]在 PCB 上方进行重复测试,还原时域瞬态电流的传播过程,据此搭建了近场扫描测试平台,如图 1 所示。测试平台主要由近场探头、机械臂、微波暗室、示波器、计算机等组成。整个测试过程在封闭的微波暗室中进行,可避免外界电磁干扰。近场探头通过机械臂实现精确定位和稳定移动,接入示波器测量感应电压时域波形。对扫描范围内每个点进行重复测试,结束后将所有的波形数据依次对应到每个扫描位置,相同时刻的数据处理为一帧图像,连续播放即可展示为采样时间段内 PCB 上电流传播流动的可视化视频。

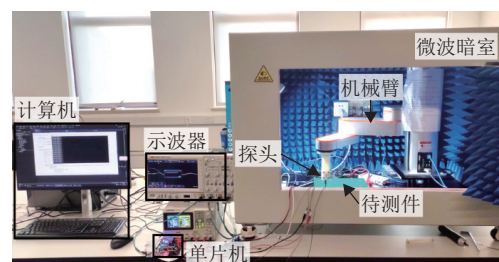


图 1 近场扫描测试平台

1.2 AI 近场扫描算法

上述传统的近场扫描方法根据设置的扫描步长,将扫描范围划分为均匀的网格,并在每个网格交界点位置处采集测试数据。然而每个测试位置上系统响应以及数据保存所需的时间基本难以缩减,随着网格数的增加,测试耗费的总时间将十分漫长。因此需要一种自适应稀疏扫描算法,通过将扫

描位置集中在电流较强的区域, 减少扫描点数量, 缩短扫描时长。

文献[13]基于委员会查询(Query-By-Committee, QBC)^[19], 提出一种主动学习方法, 根据不同的委员会模型预测结果的方差来评估未选择样本的不确定度。方差越大, 该样本的不确定度越大, 表示该样本的价值越高。文献[13]采用4种径向基函数(Radial-Basis-Function, RBF)作为委员会模型, 将其计算方差最大的未采样样本作为下一个测试位置, 最后将少量已采样样本值输入RBF插值函数计算未采样样本, 从而获取全部采样结果。该方法在实际验证中行之有效, 但只局限于频域中单频点的测试, 不能直接解决时域上多时间点样本的测试难题。

本文提出一种改进的AI近场扫描算法, 实现时域上耦合电流的高效可视化方法。相较于文献[12]的时域电流测试方法, 本算法主要在3个方面作出了改进。1) 将初始扫描点从随机采样改进为采用贪婪算法^[20-21]进行均匀采样, 避免初始选取点的无效聚集导致初始采样没有获取强电流所在的位置, 增强算法的稳定性; 2) 将时间轴上固定选取的3帧数据修改为自动计算选取; 3) 提出一种自动停止扫描的判决标准, 该标准可以将用户自定义采样点数量的简易算法改进为根据判决标准自动结束扫描进程的智能算法, 提升算法的智能性与鲁棒性。

设置初始采样点数量为 N_0 , 时域信号的长度为 T , 时域信号的某个时刻为 t , 已采样点数量为 n , 上限为 N , 即全部采样点数量。 V_1, V_2, \dots, V_n 用于存放已采样点处测得的时域信号, 且每个时域信号为 T 个数据的序列。设已采样点为 n 时插值预测的全部采样结果为 P_n , 其中包含 N 个长度为 T 的时域信号序列, 定义新增一个采样点后的 P_n 与未新增前的 P_{n-1} 在 N 个采样点中绝对误差的最大值为采样变化误差 S_n , 即:

$$S_n = \max |P_n - P_{n-1}| \quad (3)$$

定义采样变化误差标准^[22]为Error, 设定当连续增加 K 个采样点后每个 S_n 都满足 $S_n \leq \text{Error}$ 时即可结束扫描, 则AI近场扫描算法流程如图2所示。

1) 设定初始采样点数量 N_0 , 采样变化误差标准Error和需要连续满足标准的采样点个数 K , 并定义一个计数变量count统计当前满足标准的采样点个数, count=0。

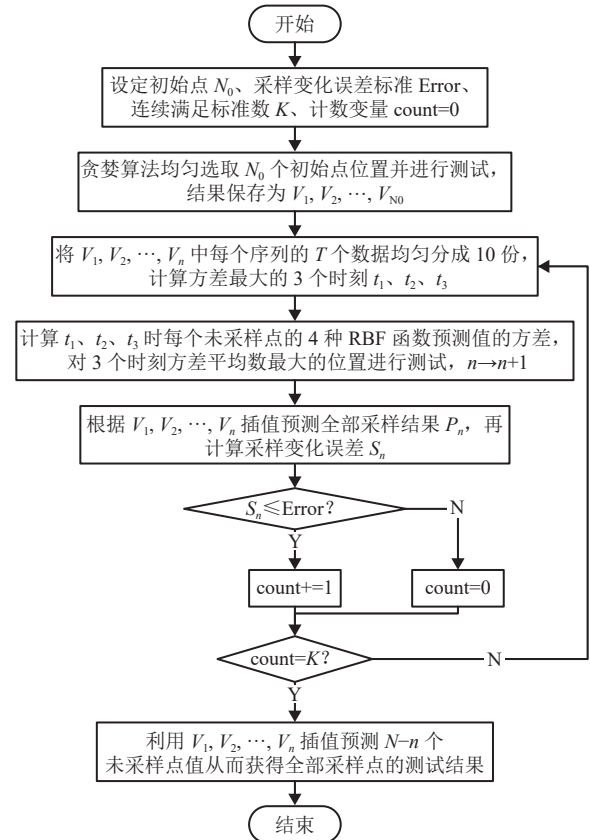


图2 AI近场扫描算法测试流程

2) 采用贪婪算法^[21]均匀选取 N_0 个初始点位置并进行测试, 获得 V_1, V_2, \dots, V_n , 其中 $n=N_0$ 。

3) 将 V_1, V_2, \dots, V_n 中每个序列的 T 个数据均匀分成10份, 计算每个时刻 V_1, V_2, \dots, V_n 值的方差, 选取每份数据中方差最大的时刻, 再选取这10个时刻中方差最大的3个时刻 t_1, t_2, t_3 去计算下一个采样点位置。

4) 采用文献[13]中的4种RBF函数对未采样点值进行预测, 计算 t_1, t_2, t_3 这3个时刻每个未采样点的4种RBF函数预测值的方差, 对这3个时刻方差平均数最大的位置进行测试, $n \rightarrow n+1$ 。

5) 根据 V_1, V_2, \dots, V_n 插值预测全部采样结果 P_n , 再计算采样变化误差 S_n 。如果 $S_n \leq \text{Error}$, count+=1; 否则, count=0。

6) 判断count是否等于 K , 如果不是, 转入步骤3)继续测试; 如果是, 结束扫描。

7) 扫描结束后利用 V_1, V_2, \dots, V_n 插值预测 $N-n$ 个未采样点值从而获得全部采样点的测试结果, 流程结束。

2 实验结果与分析

为验证AI近场扫描算法可以实现传导干扰耦

合路径的高效可视化, 本文采用高压放电电路板作为测试对象。首先分析高压放电系统中的电磁干扰问题, 再采用 AI 近场扫描算法进行高效测试, 还原板间电流分布图, 然后根据扫描结果分析电磁干扰耦合路径, 最后提出相应的抗干扰方法解决系统中的误触发问题。

2.1 高压放电系统介绍

高压放电系统由两路放电回路 (A 和 B)、升压模块、电源模块等组成, 系统版图如图 3 所示。升压部分主要由一款高增益谐振升压电源模块完成, 负载为放电回路中的储能电容。放电回路由外接的单片机注入脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 触发信号, 当输入电压达到驱动类 MOS 管的阈值时, 即可产生稳定大小的输出电压使得放电电路导通, 储能电容完成一次放电过程。

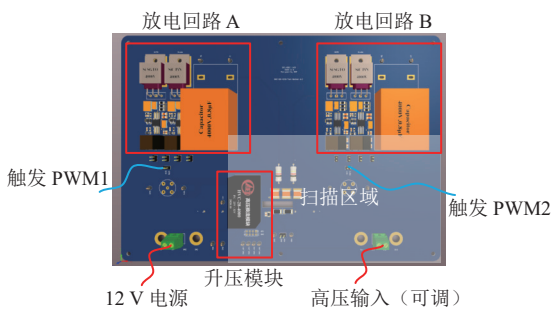


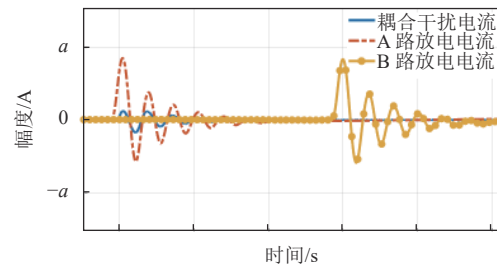
图 3 高压放电系统版图

在高压放电系统多次充放电实验过程中, 放电回路 A 的放电瞬间会产生瞬态强电磁干扰^[23], 影响放电回路 B 的正常触发, 误触发导致两路放电回路无法独立工作。由于系统内低压控制区的芯片大多为驱动类功率器件, 器件本身存在一定阈值, 电磁干扰的存在会影响该类器件的正常工作从而导致高压放电电路工作异常, 并且对前级控制电路的安全构成威胁。

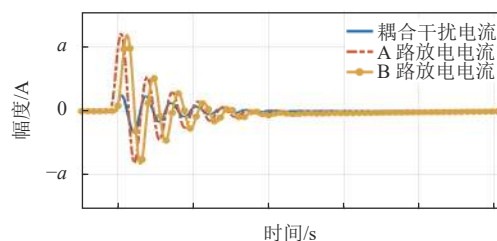
采用非接触电流测试方法对低压控制电路中的关键 MOS 芯片管脚上的耦合电流进行测量, 分析其在高压状态下的受干扰情况, 进而判断导致低压控制区误触发的原因。

实验选用磁场探头, 固定在待测位置正上方 2.5 mm 高度, 分别对高压放电电路板在低电压和高电压两种工作状态下进行测试, 电流测试结果如图 4 所示。两种工作电压下, 磁场探头均在放电回路 B 的驱动类 MOS 芯片信号管脚上捕捉到了耦合干扰电流, 该电流波形与储能电容放电波形十分相似, 且随着工作电压的上升, 储能电容放电电流和

耦合干扰电流均随之增大。当耦合电流超过触发阈值时, 放电回路 B 的储能电容提前触发放电, 因此可推断放电回路 B 的误触发是放电回路 A 储能电容放电过程中产生的耦合干扰信号导致的。



a. 低电压时耦合干扰电流与电容放电电流



b. 高电压时耦合干扰电流与电容放电电流

图 4 高压放电系统在不同电压下耦合干扰电流与放电电流波形

2.2 全部扫描与 AI 扫描算法结果对比

实验采用如图 1 所示的平台对高压放电电路板进行扫描测试, 使用计算机硬件设备为 Intel(R) Core(TM) i5-12400 CPU@2.50 GHz。磁场探头后接 30 dB 的功率放大器, 在 PCB 上方 2.5 mm 高度的水平面上扫描。每当外接单片注入一个 PWM 信号时, 放电回路 A 的储能电容完成一次放电, 示波器随之触发保存一次数据, 数据保存完毕后机械臂再自动移动到下一个扫描点进行重复的测量。扫描时, 磁场探头线圈的法线与待测走线需保持垂直^[9], 且 PCB 上走线大多为水平和垂直走向, 因此分别进行探头 0°和 90°两个方向的扫描测试, 最后取两个值中绝对值的最大值作为计算结果。

扫描区域选取在 PCB 右下角地平面位置, 为电磁干扰耦合路径的关键区域, 如图 3 所示。扫描区域为 165 mm×95 mm, 扫描步长为 2.5 mm, 因此全部扫描共有 67×39 = 2 613 个采样点。示波器采样时间间隔为 0.2 ns, 这表明数据处理后相邻两帧热度图的时间间隔仅为 0.2 ns, 实验结果可以捕捉到耦合电流的变化过程。图 5 为第 10 800 帧时放电回路 A 储能电容放电时的磁场分布, 颜色条取值范围为 [-1.5, 1.5], 后续文中热度图的颜色条均与图 5 一致。但是从图中并不能看出耦合电流的

变化轨迹, 这是因为电容放电电流过大, 产生的强磁场将耦合电流的磁场信息完全淹没, 因此需要采取相应的措施消除放电电流的磁场干扰。

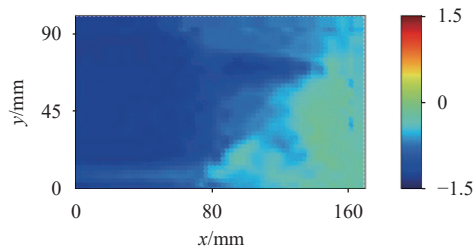


图5 放电回路A储能电容放电时电流分布(第10800帧)

本文提出一种磁场消减的方式去除放电电流的强磁场干扰。在不影响高压放电系统正常工作的前提下, 断开升压模块对放电回路B中的充电线路以及PWM2的输入线路, 使得放电回路A单独工作, 扫描获取放电回路A中储能电容放电电流的磁场分布。相同工作电压下, 双路电路同时工作时的磁场分布相当于两路电路中时域电流产生磁场的矢量累积, 而磁场探头测试只存在于X、Y方向, 因此将两个方向下双路工作的测试结果与放电回路A单独工作的结果分别相减, 即可去除放电回路A放电电流的磁场干扰。实验结果如图6所示, 4个子图为不同时刻的PCB上方磁场分布热度图, 从中可以很明显地观察放电回路A储能电容瞬态放电过程中PCB上耦合电流大小随时间的增强过程以及电流的分布变化情况。图中颜色的深浅反映电流的大小, 其中红色和蓝色可表明电流两种相反的流动方向。该磁场消减的方法可为高低压混合系统的电磁干扰分析提供借鉴意义。

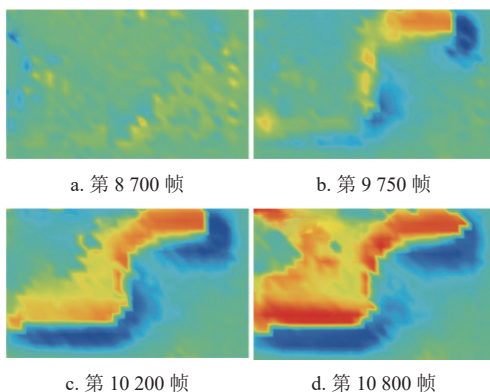


图6 耦合电流在PCB上的分布和传播过程

采用AI近场扫描算法对传导耦合路径测试进行优化。设置初始采样点数 $N_0=50$, 采样变化误差标准 $\text{Error}=-10\text{ dB}$, 连续满足标准点数 $K=70$, 其他参数均与全部扫描一致。AI扫描算法同样进行

了X、Y两个扫描方向的测试, 相对应的 H_y 和 H_x 扫描点分布如图7所示, 第10800帧的扫描结果见图8a和图8b, 图8c为取 H_y 和 H_x 的绝对值的最大值的合成结果。由图8可见, AI算法扫描点均集中分布在电流较强的区域, 这表明算法能够自适应识别扫描区域中的重点扫描位置, 从而在减少扫描点的情况下保证测试结果的准确性。图8c可以清晰地显现传导电流耦合路径, 与图6中第10800帧的同区域扫描结果基本一致。将AI算法扫描时间和全部扫描相比, 具体数据见表1, 尽管AI算法扫描在计算上消耗了一些时间, 但是在大量减少扫描点的优势下, 总体耗费时间约为全部扫描的1/9, 大幅度提升了近场扫描的测试效率。

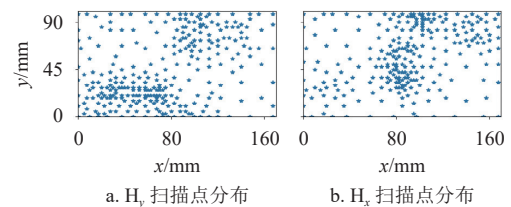


图7 AI算法扫描点分布

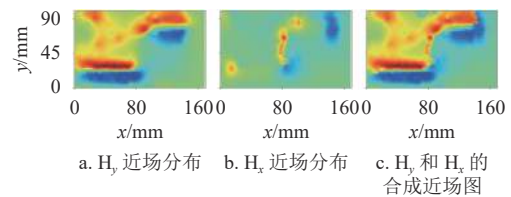


图8 AI算法扫描结果: $N_0=50$, $K=70$, $\text{Error}=-10\text{ dB}$ (第10800帧)

表1 AI算法扫描与全部扫描时间对比

算法	计算时间/s	总时间/s	总扫描点数
全部扫描 (H_y 和 H_x)	0	8 884.2	2 613
AI算法扫描 (H_y)	12.8	971.9	282
AI算法扫描 (H_x)	10.2	856.5	249

2.3 耦合路径分析与干扰抑制方法

根据近场扫描获取的实验结果, 可以确定传导电流的传播轨迹, 如图9中白色路线所示。传导电流由导线传播到地平面后, 通过地平面到达放电回路B的低压控制电路, 最后通过导线流向其他区域。这也证明图4中放电电压较低时电路可以正常工作, 而放电电压较高时放电回路B提前触发放电的实验现象。

结合以上分析得到的传导耦合路径, 电磁干扰抑制方法^[24]可以直接切断耦合路径中的部分地平面, 使得传导电流不能对放电回路B的低压控制电路产生干扰, 示意图如图9所示。

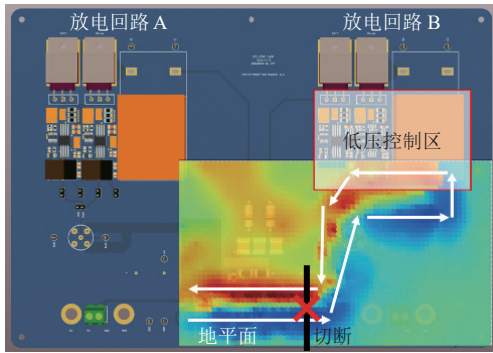


图 9 传导电流传播路径及切断示意图

在不影响整个电路的正常工作前提下对电路板的地平面进行物理切断, 反复实验后放电回路 B 不再产生误触发现象。采用 AI 近场扫描验证改造后的磁场分布变化, 实验结果如图 10 所示。图 10a 是放电电流磁场干扰依然存在的结果, 和图 5 相比几乎没有区别; 而图 10b 中消除了放电电流磁场干扰, 与图 5 中同时刻的实验结果相比, 耦合电流得到了很好地抑制, 证明了该干扰抑制方法的有效性, 也随之证明电磁干扰耦合路径分析的可靠性。

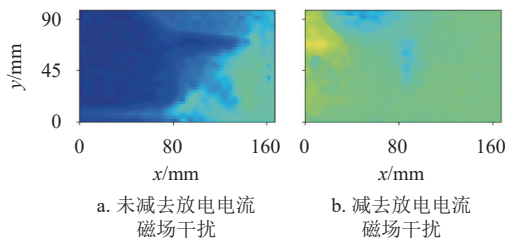


图 10 切断耦合路径后放电回路 A 电容放电时磁场分布 (第 10 800 帧)

3 参数分析

初始采样点数 N_0 、连续满足标准点数 K 、采样变化误差标准 Error 的设置均会对 AI 近场扫描算法的稳定性以及测试精度产生影响。

3.1 初始采样点数的影响

初始采样点数 N_0 的设置影响 AI 扫描算法的稳定性。采用 AI 算法扫描与全部扫描结果的均方误差 (Mean-Square Error, MSE) 作为评价指标。从第一个扫描点开始计算 MSE, N_0 分别设定为 10、50、100、150, 实验结果如图 11 所示。随着扫描点数量的不断增加, MSE 基本都保持下降, 只有 $N_0=10$ 时在扫描点较少时 MSE 有部分上升。说明 AI 扫描算法扫描点越多, 测试精度越高。不仅如此, $N_0=10$ 与 $N_0=150$ 时在扫描点数为 120 和 220 时算法精度不如其他 N_0 选取情况, 算法的稳定性不强。因为当 N_0 过小时, 当前已采样结果并不能让算法快速找到强电流位置; 而当 N_0 过大

时, 前期大量的均匀初始点不能更好地发挥 AI 算法的优势。因此, 初始采样点数应该选取适当, 推荐选值为全部总扫描点数的 2%~4%。

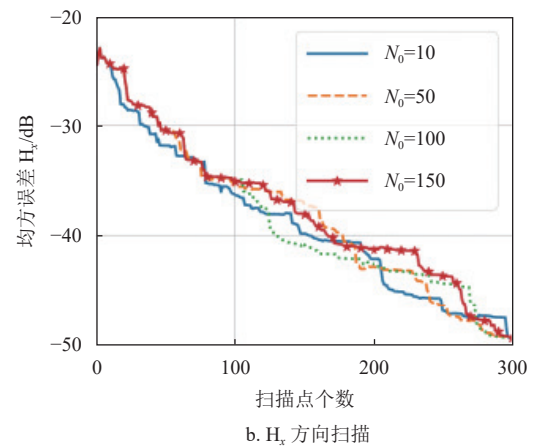
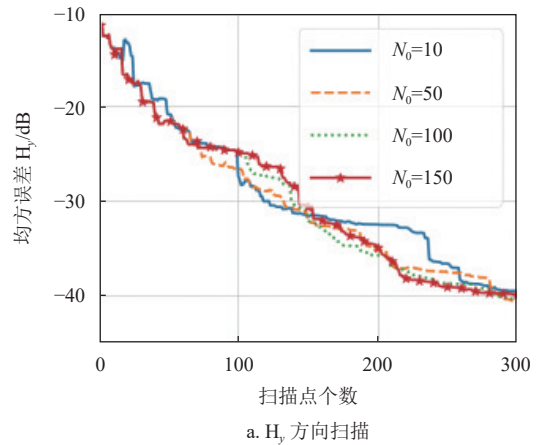


图 11 初始采样点对算法的影响

3.2 K 值设置的影响

K 与 Error 的设置将共同决定 AI 扫描算法何时结束测试。设定 $N_0=50$, Error=-10 dB, 研究不同 K 值对算法结束时总扫描点的影响, 总扫描点越多, 测试精度越高。实验结果如图 12 所示, 随着 K 值的增大, 算法总测试精度也随之增加。当 $K \geq 70$ 时, 总扫描点数逐渐饱和, 这说明新增采样点后的采样变化误差 S_n 一直满足 $S_n \leq \text{Error}$, 当前 AI 扫描算法测试结果已经达到所设标准。

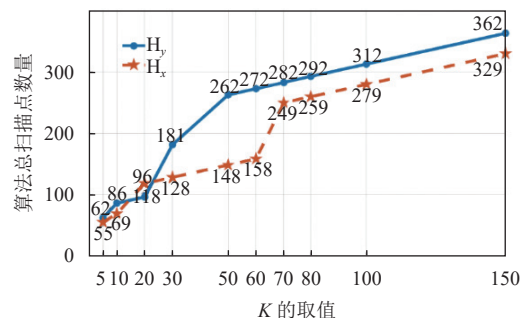


图 12 K 值对算法的影响

3.3 Error 设置的影响

采样变化误差标准 Error 的设置越高, 表示算法对采样变化误差 S_n 的变动要求越宽容, 测试精度要求越低; 反之, 精度要求越高。设定 $N_0=50$, $K=70$, 研究不同 Error 设置对算法结束后总扫描点的影响, 实验结果如图 13 所示。Error 的设置越低, 越难满足标准值, 因此算法总扫描点数随之增加。相比于图 8 中 Error=-10 dB 的结果, 当 Error=-5 dB 时, 图 14 中耦合路径的可视化效果较差, 与全部扫描结果差距较大, 因此 Error 设置为-10 dB 最为合适。

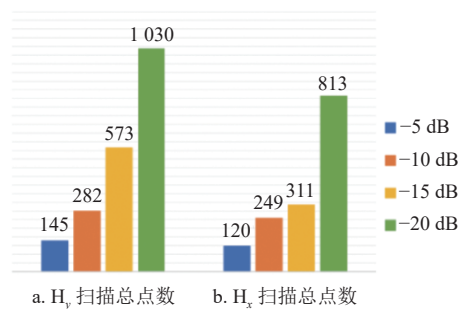


图 13 Error 设置对算法的影响

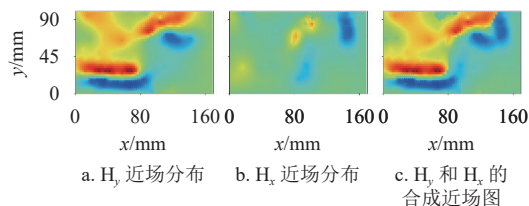


图 14 AI 算法扫描结果: $N_0=50$, $K=70$, Error=-5 dB (第 10 800 帧)

4 结束语

本文提出一种改进的 AI 近场扫描算法, 在高压放电系统中进行了实验验证。首先分析系统中双路放电回路的误触发机理, 然后通过 AI 近场扫描算法实现传导电流传播路径的高效可视化, 并采取切断耦合路径的方法解决系统中的瞬态电磁干扰问题。实验结果表明, 在本文所研究的高压放电系统中, 所提出的高效率 AI 近场扫描方法相比于传统近场扫描方法, 可将测试效率提高 9 倍以上。此外, 本文还提出一种自动停止 AI 近场扫描的判决标准, 分析了不同参数的选择对于该判决标准的影响, 最终确定最优参数选择。该判决标准赋予 AI 近场扫描方法高智能化与强鲁棒性。本文所提出的基于 AI 高效率近场扫描可视化方法, 对解决瞬态强电磁环境下测试时间长、耦合机理不明确等问题具有重要的启发和借鉴意义。

参考文献

- [1] 李廷帅, 李子豪, 易涛, 等. 强激光打靶辐射电磁脉冲诱导导线串扰模拟[J]. *电子科技大学学报*, 2022, 51(5): 709-714.
- [2] LI T S, LI Z H, YI T, et al. Simulation of cable crosstalk generated by electromagnetic induced by high-power laser shooting targets[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2022, 51(5): 709-714.
- [3] 阮琬玮. 基于场线路耦合的高压电子系统电磁干扰建模与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [4] RUAN W W. Modeling and simulation of electromagnetic interference of high-voltage electronic system based on field-TL-circuit coupling[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [5] 王杰. 高压放电系统传导电磁干扰建模及滤波抑制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [6] WANG J. Research on modeling and filtering of conducted electromagnetic interference in high voltage discharge system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [7] 胡皓全, 杨显清, 赵家升. 雷达之间电磁干扰预测模型研究[J]. *电子科技大学学报*, 2001, 30(1): 37-40.
- [8] HU H Q, YANG X Q, ZHAO J S. Research on mathematics models for electromagnetic interference prediction between radar systems[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2001, 30(1): 37-40.
- [9] 肖培, 王珏, 凌明祥, 等. 场线路多耦合下电机及其驱动系统辐射电磁干扰预测方法研究[J]. *电子学报*, 2017, 45(10): 2449-2456.
- [10] XIAO P, WANG J, LING M X, et al. An efficient approach for predicting electromagnetic interference emission of motor and its driver system under field-circuit and TL coupling[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(10): 2449-2456.
- [11] 孟培培, 张向明, 张晋, 等. 功率变流器传导干扰多通路频域模型研究[J]. *电子学报*, 2018, 46(10): 2480-2485.
- [12] MENG P P, ZHANG X M, ZHANG J, et al. Research on multiple-paths frequency-domain conducted interference modeling for power converters[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(10): 2480-2485.
- [13] WANG J W, YAN Z W, FU C S, et al. Near-field precision measurement system of high-density integrated module[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 9509109.
- [14] VRIGNON B, ABOUDA K, DORIDANT A, et al. Time-domain measurements using near field scanning method for fast transient current reconstruction[C]//Proceedings of the 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits. New York: IEEE, 2017: 119-124.
- [15] QIU H M, FANG W X, EN Y F, et al. Movable noncontact RF current measurement on a PCB trace[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(9): 2464-2473.
- [16] CAIGNET F, NOLHIER N, BAFLEUR M. Dynamic

- system level ESD current measurement using magnetic field probe[C]//Proceedings of the Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. New York: IEEE, 2015: 490-493.
- [11] HUANG W, POMMERENKE D, XIAO J, et al. A measurement technique for ESD current spreading on a PCB using near field scanning[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. New York: IEEE, 2009: 18-23.
- [12] XIE Y T, ZHANG L, CHEN J H, et al. Efficient discharge waveform distribution measurement using active machine learning[C]//2022 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems (EDAPS). Urbana: IEEE, 2022: 1-3.
- [13] ZHANG L, FENG Y R, PU B, et al. A novel machine-learning-based batch selection method in sparse near-field scanning[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(11): 5019-5028.
- [14] BOYER A, NOLHIER N, CAIGNET F, et al. Closed-form expressions of electric and magnetic near-fields for the calibration of near-field probes[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 2007315.
- [15] ZHANG J, KAM K W, MIN J, et al. An effective method of probe calibration in phase-resolved near-field scanning for EMI application[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(3): 648-658.
- [16] RODRÍGUEZ V F, FERNANDEZ Á J, GALOCHA I B, et al. Numerical and experimental investigation of phaseless spherical near-field antenna measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(12): 8830-8841.
- [17] SONG T H, WEI X C, JU J J, et al. An effective EMI source reconstruction method based on phaseless near-field and dynamic differential evolution[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(5): 1506-1513.
- [18] JU J J, XU Z X, WEI X C. EMI source positioning method based on phaseless near-field scanning[C]//Proceedings of the Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. New York: IEEE, 2022: 813-815.
- [19] KROGH A, VEDELSBY A. Neural network ensembles, cross validation, and active learning[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1995, 7: 231-238.
- [20] YU H, KIM S. Passive sampling for regression[C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Data Mining. Sydney: IEEE, 2010: 1151-1156.
- [21] WU D, LIN C, HUANG J. Active learning for regression using greedy sampling[J]. *Information Sciences*, 2019, 474: 90-105.
- [22] YE X N. EMC society standards update: IEEE 370-2020 now published! Electrical characterization of printed circuit board and related interconnects at frequencies up to 50 GHz[J]. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2021, 10(2): 96.
- [23] 陆逸敏, 黄庆安, 廖小平. MEMS 电容式并联开关充放电产生的电磁干扰分析[J]. *电子器件*, 2006, 29(1): 76-78.
LU Y M, HUANG Q A, LIAO X P. Analysis of electromagnetic interference for capacitive MEMS shunt switches[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2006, 29(1): 76-78.
- [24] 张瑛, 李向群, 许晓林. 电子设备的电磁兼容[J]. *电子器件*, 2003, 26(2): 199-200.
ZHANG Y, LI X Q, XU X L. The electromagnetic compatibility of power electronics[J]. *Journal of Electron Devices*, 2003, 26(2): 199-200.

编辑 张莉