

电子设备电磁敏感性仿真分析及优化设计方法

张爱民¹, 张蕾¹, 张杭², 陈德桂²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出了将高频电磁干扰环境中的电子设备作为整体来进行电磁敏感性仿真分析和优化设计的总体思路和分析方法. 对于外部区域,改进已有的电磁散射的数值计算方法,在机壳表面采用四边形的片元模型代替已有算法中的三角形片元模型,重新定义电子设备外部区域面上的基函数,并根据机壳表面的对称关系对算法进行优化,减少了外部感应电流的运算时间. 对于内部区域,利用基于微粒群优化算法的递归动态神经网络建立电子设备内部电路对于干扰的高频仿真模型,提出对于内部电路参数进行优化设计的方法. 所建立的神经网络模型解决了以往电子设备在电磁敏感性仿真分析和优化设计过程中,仿真模型存在的计算量和存储量大的问题. 优化设计方法改变了以往寻优过程中穷尽式搜索的方式.

关键词: 电子设备;高频电磁干扰;基函数;神经网络;优化设计

中图分类号: TP29; TN70 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0005-05

Simulation Analysis and Optimization for the Electromagnetic Susceptibility of Electronic Devices

ZHANG Aimin¹, ZHANG Lei¹, ZHANG Hang², CHEN Degui²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The overall thought and methodology of the simulation analysis and optimization for the electromagnetic susceptibility (EMS) of electronic devices in the industrial environment are proposed on account of high frequency electromagnetic interference. The existing numerical calculation method in electromagnetic scattering for external subdomains is modified, where the calculation time for external induced currents is reduced by replacing the original planar triangular surface patch modeling with the quadrilateral surface patch modeling on the enclosure surface. The basis functions on the external subdomain surface of electronic devices are redefined, and the algorithm is optimized based on symmetrical relation of the enclosure surface. For the internal subdomain, the dynamic recurrent neural network based on particle swarm optimization algorithm is employed to establish a high frequency simulation model of the interference for the internal circuit of electronic device. An optimization method for parameters of internal circuits is given based on the model. The problem of huge amount of calculations and storages in existing simulation models of EMS is avoided by the proposed neural model, and the conventional exhaustive search during optimization process is changed by the proposed optimization method.

Keywords: electronic device; high frequency electromagnetic interference; basis function; neural network; design optimization

当工业环境中的电子设备处于高频电磁干扰环境中时,其屏蔽机壳和外引线会接收高频干扰信号

作为内部电路的激励源,这样对内部电路的正常工作产生影响.目前,针对电子设备PCB板级的电磁敏感性(EMS)仿真分析,已经做了大量的研究工作^[1-5],但是将工业环境中的电子设备作为整体进行EMS的仿真分析工作才刚刚开始,还没有涉及到对内部电路参数优化设计的研究.文献[6-7]根据场路结合的思想,将外部高频电磁干扰对内部电路的影响等效为电流源和电导并联的等效源模型的作用,但是由于这类算法在机壳表面上选取基函数时,采用的是三角形剖分的方法,因此使得电流密度表达式中的未知系数多,求解代数方程的运算时间长.

在对电子设备进行优化设计时,由于需要反复计算内部高速电路的响应,已往的低频集总参数模型、较高频率分布参数模型以及高频全波模型,在仿真时都耗时太多,因此改进电子设备外部等效源模型中感应电流的计算方法,建立电子设备内部电路精确、高速的仿真模型就迫在眉睫.

本文在上述研究的基础上,提出了将工业环境中的电子设备作为整体进行EMS仿真分析和优化设计的总体思路和分析方法.对于矩形的机壳表面,用四边形的片元模型代替了已有算法的三角形片元模型,并根据机壳表面的对称关系和机壳表面与外引线之间的位置关系,对算法进行了优化,减少了运算时间.最后采用微粒群优化算法(PSO)与Levenberg-Marquardt(L-M)算法相结合的网络训练方法,利用高频仿真软件构造的样本集,建立了电子设备内部电子电路的递归动态神经网络(RDN)模型.

1 EMS仿真分析和优化设计的总体思路

首先,采用文献[6]提出的等效源模型,将外部高频电磁干扰对内部高速电路的影响等效为电流源和电导并联的作用.然后,按照将电子设备内部区域划分的接口电路、传输通道和内部高速电路3个部分,分别建立高频仿真模型,将得到的外部高频电磁干扰的等效源模型作为内部区域电路高频仿真模型的输入激励,分析由外引线引进的高频电磁干扰对内部电路的影响,即对内部电路进行EMS仿真分析.最后,根据由高频电磁场仿真软件仿真分析得到的样本数据,对神经网络进行训练,建立电子设备内部电路对于干扰的神经网络仿真模型.在此基础上,采用基于PSO算法和遗传算法的多目标优化方法,对内部电路参数进行优化设计,使内部电路对输入

的高频电磁干扰的敏感程度达到最低.

2 改进的外部高频电磁干扰计算方法

在计算外部区域高频电磁干扰在其机壳表面的连接点处产生的感应电流时,本文将受到高频电磁干扰照射的电子设备外部区域分为3部分,即机壳的矩形表面、外引线和连接点,如图1所示.在利用矩量法求解外部区域电场积分方程(EFIE)时,根据电子设备机壳表面的几何特点,本文采用四边形的片元模型代替三角形片元模型,重新定义其基函数.

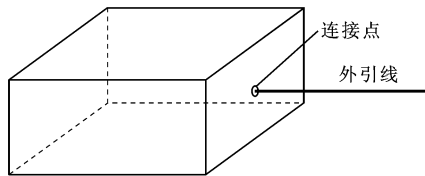


图1 电子设备屏蔽机壳与外引线的结构图

2.1 基函数的选取

在机壳表面上,基函数选择如下

$$f_n^B(r) = \begin{cases} \frac{\rho_b^+}{A_n^+}, & r \in T_n^+ \\ \frac{\rho_b^-}{A_n^-}, & r \in T_n^- \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_n^+ 和 A_n^- 分别为四边形 T_n^+ 和 T_n^- 的面积; ρ_b^+ 为由边 l_n 的对边到 T_n^+ 中任意一点的垂直矢量; ρ_b^- 为由 T_n^- 中任意一点指向边 l_n 的对边的垂直矢量; r 为四边形 T_n^+ 和 T_n^- 中任意一点的位置矢量.上述各量的含义如图2所示.

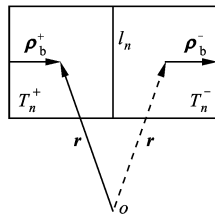


图2 四边形片元模型中边与矢量定义示意图

外引线上基函数的表达式为

$$f_n^W(r) = \begin{cases} \frac{\rho_l^+}{h_n^{W+}}, & r \in S_n^{W+} \\ \frac{\rho_l^-}{h_n^{W-}}, & r \in S_n^{W-} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_l^+ 、 ρ_l^- 分别为第 n 个节点的左侧和右侧

线段的自由顶点到线面内任意一点的距离; h_n^{w+} 和 h_n^{w-} 分别为第 n 个节点的左侧和右侧线面的高; S_n^{w+} 和 S_n^{w-} 分别为第 n 个节点左侧和右侧线段表面. 图 3 为外引线上各几何参数示意图.

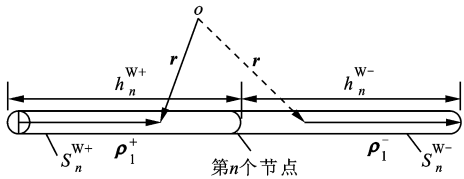


图 3 线上节点的几何参数

连接点处的基函数由两部分组成,具体表达式如下^[8]

$$f^l(r) = \begin{cases} K_t \left[1 - \frac{(h_t^{l+})^2}{(\rho_t^+ \cdot \hat{h}_t^{l+})^2} \right] f_t^B(r), & r \in S_t^{l+} \\ f^W(r), & r \in S^{l-} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{3}$$

$$K_t = \frac{\alpha_t}{l_t \sum_{t=1}^N \alpha_t} = \frac{\alpha_t}{l_t \alpha_T} \tag{4}$$

式中: S_t^{l+} 为与连接点相连的面上部分的第 t 个三角形面; S^{l-} 为与连接点相连的线上部分; h_t^{l+} 为三角形 S_t^{l+} 的高; ρ_t^+ 为三角形内任一点到 S_t^{l+} 的自由顶点的矢量; $\hat{h}_t^{l+}$ 为矢量高; α_t 为第 t 个三角形的张角; α_T 为三角形张角的总和,由于本文讨论的是平面,因此有 $\alpha_T = 2\pi$; $f_t^B(r)$ 表示与连接点相连的面上的基函数; $f^W(r)$ 表示与连接点相连的线上的基函数; N 为与连接点相连的面上划分的三角形的总数,按照图 4 所示的剖分有 $N=4$. 连接点处的几何结构如图 4 所示.

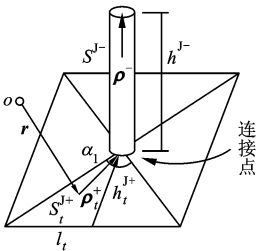


图 4 线与面的连接点处的几何参数

应用伽辽金法,直接选择基函数作为检验函数,将面上、线上和连接点处的加权余量方程合在一起,就构成了求解电流密度表达式中的未知系数的矩阵方程,这里不再赘述,详见文献[9].

2.2 矩阵方程求解的优化算法

在求解文献[9]的矩阵方程时,矩阵方程的系数

计算占据了大量的运算时间.当源点和观测点都位于机壳表面时,矩阵系数^[9]的计算包括矩形表面上每个单元对其他所有单元中心的矢量位 A 和标量位 Φ 的计算.当 2 个四边形块的相对位置相同时,它们的面积分相等.机壳矩形表面 4 个角上的四边形对其他各四边形中心的位函数 A 和 Φ 包含了所有的 2 个四边形之间的位函数情况,因此只需分别算出这 4 个四边形对其他各四边形中心的位函数 A 和 Φ ,将其存入矩阵中,使矩阵元素的下标与两四边形的位置关系关联,在计算矩阵方程的系数时,只需要利用位置关系直接从矩阵中取值,进行组合运算即可,这样就避免了大量的重复面积分运算.

3 基于神经网络的内部电路干扰的建模与优化设计方法

本文为电子设备内部电路的干扰建立的 RDN 模型如图 5 所示,其中静态输入层用于输入需优化的内部电路参数.

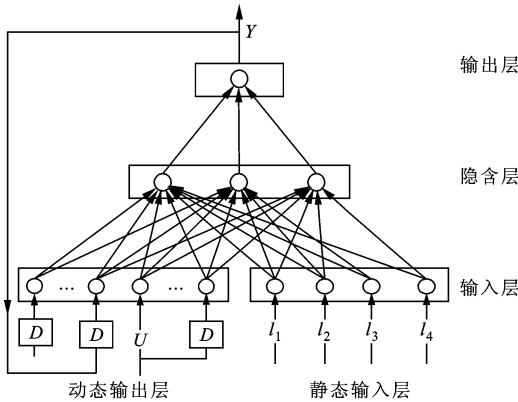


图 5 RDN 网络模型结构

在网络的训练过程中,本文将 PSO 算法与 L-M 算法相结合,利用 PSO 能在较大范围内以较快的速度缩小寻优范围,而且不易陷入局部最优值的优点^[10-11],先采用 PSO 方法对神经网络的权值和阈值进行参数优化,然后再利用 L-M 算法在缩小的寻优范围内以较快的速度对网络进行训练.这样,不仅缩短了整个网络的训练时间,而且大大减小了训练网络模型时的工作量.

在对电子设备内部电路参数进行优化设计时,可将问题描述为:对于给定的电子设备内部电路,在设计 PCB 时,具有高频效应的连接线的长度和间距为何值时,在电路的不同位置上产生的干扰响应为最小.其中连接线长度和间距为需要优化的参数,而使整个内部电路在不同点上产生的干扰响应最小是优化设计的目标.

本文采用遗传算法对内部电路的连接线长度和间距等参数进行优化设计。

4 仿真实例

本文采用的仿真模型的外部区域由 $0.30\text{ m} \times$

$0.20\text{ m} \times 0.30\text{ m}$ 的机壳以及半径为 1 mm 、长度为 1 m 的外引线组成,其结构如图 1 所示. 外引线通过机壳上的半径为 2 mm 的圆孔与内部电路相连接. 内部区域的信号传输网络的等效电路如图 6 所示.

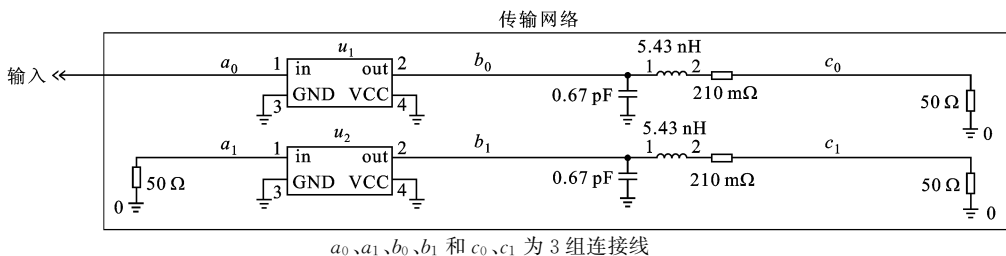


图 6 传输网络的等效电路原理图

仿真时假设幅值为 1 V/m 的平面电磁波干扰照射在如图 1 所示的电子设备的外部区域,采用本文改进算法计算得到的等效源模型中的感应电流幅值和相位曲线如图 7 所示,等效源模型中的阻抗和电抗曲线如图 8 所示.

当 RDN 网络模型的输出为连接线 c_0 末端处的干扰输出信号时,训练得到的神经网络模型中的具体参数为:输入和输出反馈的延迟分别为 3 和 4;隐含层和输出层神经元数分别为 63 和 1. 当 RDN 网络模型的输出为连接线 c_1 末端处的串扰信号时,其

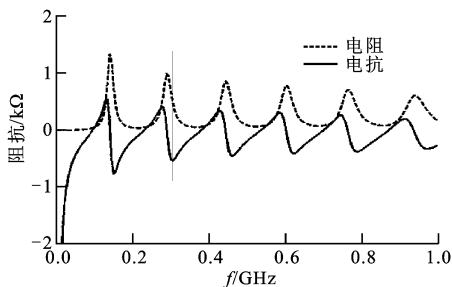


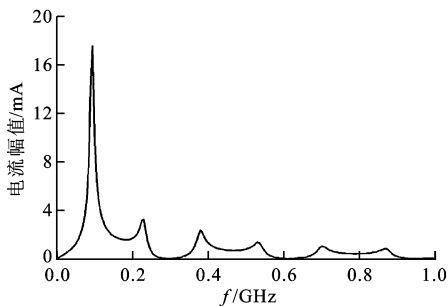
图 8 等效内阻曲线

神经网络中的输入和输出反馈延迟分别为 1 和 3;隐含层和输出层神经元个数分别为 25 和 1.

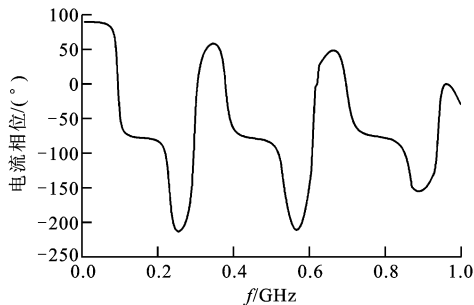
对上述建立的两个神经网络,在参数变化范围内采用遗传算法进行参数优化,其结果为当图 6 所示的两组连接线 b_0, b_1 和 c_0, c_1 的长度分别为 2.68 和 3.24 cm 、间距分别为 1.725 和 1.905 mm 时,在信号传输网络输出端产生的干扰输出和串扰信号达到最小. 图 9 给出了采用遗传算法进行优化设计前后的结果对比.

5 结 论

本文提出了对处于高频电磁干扰环境中的电子设备进行 EMS 仿真分析和优化设计的总体思路 and 具体方法,改进了电子设备外部区域等效源模型中的感应电流的计算方法,并从机壳表面的分块方式以及算法的优化两个方面,对已有算法进行改进,使其在求解电场积分方程过程中的未知数的个数明显减少,运算速度得到了很大提高. 本文又提出了为电子设备内部电路建立神经网络仿真模型和对其进行优化设计的方法. 本文建立的神经网络仿真模型运算时间短,解决了以往在对电子设备进行 EMS 仿



(a) 幅值曲线



(b) 相位曲线

图 7 感应电流曲线

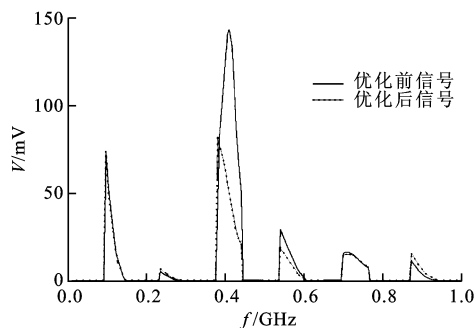
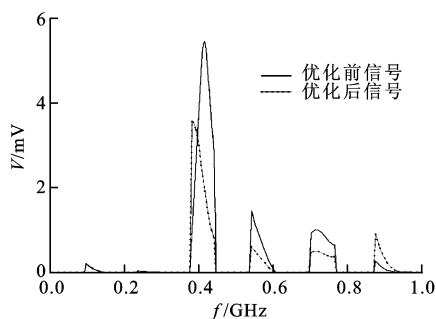
(a) c_0 点处干扰输出(b) c_1 点处串扰信号

图9 采用遗传算法进行优化设计的结果对比

真分析和优化设计时,需要反复计算干扰响应,而常用的高频仿真模型却计算量和存储量大,不易被调用的矛盾。

参考文献:

- [1] ANTONINI A, DESCHRIJVER D, DHAENE T. Broadband rational macromodeling based on the adaptive frequency sampling algorithm and the partial element equivalent circuit method [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(1):128-137.
- [2] SRIDHAR A, NAKHLA N, ACHAR R, et al. Fast EMC analysis of high-speed interconnects via waveform relaxation and transverse partitioning [C]//IEEE International Symposium on Electrical Performance of Electronic Packaging. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:329-332.
- [3] LIU Enxiao, LI Erping, LI Lewei, et al. Finite-difference time-domain macromodel for simulation of electro-

magnetic interference at high-speed interconnects [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2005, 41(1):65-71.

- [4] CHEN Guoqing, FRIEDMAN E G. Transient simulation of on-chip transmission lines via exact pole extraction [C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:2757-2760.
- [5] NAKHLA N, NAKHLA M, ACHAR R, et al. Parallel simulation of high-speed interconnects using delay extraction and transverse partitioning [C]//IEEE International Symposium on Electrical Performance of Electronic Packaging, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:237-240.
- [6] YUAN Weiliang, LI Erping. A systematic coupled approach for electromagnetic susceptibility analysis of a shielded device with multilayer circuitry [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(4): 692-699.
- [7] PHYU HN, LI Erping, YUAN Weiliang. Analysis of electromagnetic susceptibility on high speed circuits located in shielded enclosure [C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006:312-315.
- [8] HWU S U, WILTON D R. Electromagnetic scattering and radiation by arbitrary configurations bodies and wires [R]. Houston, TX, USA: University of Houston. Department of Electrical Engineering. Applied Electromagnetics Laboratory, 1998.
- [9] 张爱民. 电子设备电磁敏感性仿真分析及优化设计方法研究[D]. 西安:西安交通大学电气工程学院, 2008: 25-28.
- [10] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [11] XIAO Peng, VENAYAMOORTHY G K, CORZINE K A. Combined training of recurrent neural networks with particle swarm optimization and backpropagation algorithms for impedance identification [C]//IEEE Swarm Intelligence Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:9-15.

(编辑 刘杨)