

板级高速互连线的物理特征优化方法

梁卓灏¹ 杨其宇¹

LIANG Zhuohao YANG Qiyu

摘要

针对板级高速互连线的物理特征优化问题,采用非支配排序遗传算法III(NSGA-III)、推拉搜索算法(PPS)和TIGE2算法对其进行优化,主要针对板级高速互连线信号完整性的反射、串扰和损耗的多目标优化问题,并结合实际工程设计时的生产工艺、性能要求和材料成本设定了多个约束条件。对比优化前起始结构的目标函数和三种遗传算法优化结构的目标函数,结果显示,三种遗传算法都可以用于处理板级高速互连线的物理特征优化问题,其中NSGA-III优化结构的目标函数总和最小,算法的运算时间较短,在实际的工程设计中更具备指导意义。

关键词

遗传算法; 信号完整性; 板级高速互连线; 非线性约束; 多目标优化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.03.031

0 引言

随着电子元器件不断地向着高性能、小体积和低功耗等方向发展,板级互连线的传输速度和布线密度在过去的几十年里不断提高,目前板级高速互连线单通道的传输速度设计要求高达56 GB/s^[1],同时,串扰、反射、损耗等信号完整性问题也随之出现^[2],国际半导体技术蓝图ITRS指出电子系统的未来发展将会受限于板级高速互连线的信号完整性性能^[3]。

随着机器学习在近年的快速发展,为了减少对硬件工程师设计经验的依赖,国内外的研究人员使用机器学习进行信号完整性的研究工作。Heegon Kim等人提出一种基于神经网络的板级高速互连的建模办法,采用W-Element RLGC矩阵与频率无关的特点,简化了互连线模型^[4]。黄中钊在Heegon Kim的基础上,考虑了生产工艺的影响,优化了人工神经网络对板级高速互连线的建模,代理模型预测得到的参数精度达到96.2%^[5]。

本文根据黄中钊提出的基于W-Element RLGC矩阵的板

1. 广东工业大学 广东广州 511400

[18]DAI Z H, YANG Z L, YANG Y M, et al. Transformer-XL: attentive language models beyond a fixed-length context[C]// Annual meeting of the association for computational linguistics. Stroudsburg, PA: Association for Computational Linguistics, 2019:2978-2988.

[19]朱哲峰. 基于Vision Transformer的图像分类算法研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.

[20]张艺超, 郑向涛, 卢孝强. 基于层级Transformer的高光谱图像分类方法[J]. 测绘学报, 2023, 52(7): 1139-1147.

[21]YU W, ZHOU J, WANG H B, et al. SETransformer: speech enhancement transformer[J]. Cognitive computation, 2022, 14: 1-7.

[22]DING M, YANG Z Y, HONG W Y, et al. Cogview: Mastering text-to-image generation via transformers[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021, 34: 19822-19835.

[23]HAN C, WANG M X, JI H, et al. Learning shared semantic space for speech-to-text translation[C]// Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Stroudsburg: Association for Computational Linguistics, 2021: 2214-2225.

【作者简介】

夏雪(1998—), 女, 安徽省合肥人, 硕士研究生, 研究方向: 润滑油监测与状态评估。

闫恩来(1998—), 男, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 研究方向: 润滑油监测与状态评估。

李喜武(1971—), 男, 通信作者, 吉林长春人, 博士, 副教授, 研究方向: 设备智能监测与控制。

(收稿日期: 2023-12-12)

级高速互连线代理模型，为了得到更高的信号完整性性能，对于板级高速互连线的物理特征进行优化。本文介绍了多目标优化问题和常见的多目标优化算法，采用非支配排序遗传算法Ⅲ（NSGA-Ⅲ）^[6]对板级高速互连线的宽度 W 、差分对内间距 S_d 、差分对间间距 S_p 和介电层参数等物理特征进行优化。同时使用了推拉搜索算法（PPS）^[7]和 TIGE2 算法^[8]对板级高速互连线的物理特征进行优化，对比三种遗传算法优化物理特征过后的目标函数，三种遗传算法都可以用于处理板级高速互连线的物理特征优化问题。

1 目标函数

目标函数 $F(x)$ 是一个标量，是用设计变量来表示的所追求的目标形式，从工程意义讲，建立目标函数的过程就是寻找设计变量与目标的关系的过程，目标函数是系统的性能标准。针对图 1 所示的板级高速互连线结构，分析其信号完整性的反射问题，主要受到互连线的差模阻抗 Z_{diff} 和共模阻抗 Z_{comm} 的影响，差模阻抗的目标值是 $100\ \Omega$ 、共模阻抗的目标值是 $25\ \Omega$ ^[9-10]。

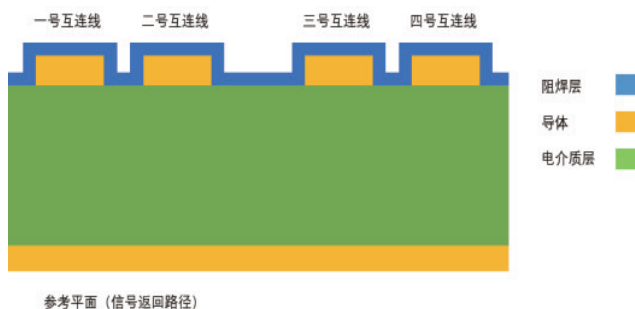


图 1 板级高速互连线的结构

根据板级高速互连线代理模型，得出的 W-Element RLGC 矩阵，包括 Co_{11} 、 Co_{12} 、 Co_{22} 、 Co_{13} 、 Co_{23} 、 Lo_{11} 、 Lo_{12} 、 Lo_{22} 、 Lo_{13} 、 Lo_{23} 、 Ro_{11} 、 Go_{11} 、 Rs_{11} 、 Gd_{11} ，分析一号互连线的差模阻抗和共模阻抗，计算公式为：

$$Z_{diff} = 2\sqrt{\frac{L_0 - L_m}{C_{load} - C_m}} = 2\sqrt{\frac{Lo_{11} - Lo_{12}}{Co_{11} + Co_{12}}} \quad (1)$$

$$Z_{comm} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L_0 + L_m}{C_{load} - C_m}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{Lo_{11} + Lo_{12}}{Co_{11} - Co_{12}}} \quad (2)$$

针对板级高速互连线信号完整性的串扰问题，其主要受到互连线的近端串扰 NEXT 和远端串扰 FEXT 的影响，二者越小越好，故近端串扰和远端串扰的目标值都是 0^[11]。设置二号互连线作为受害线，设置三号互连线和四号互连线作为攻击线，研究这两条互连线对二号互连线串扰造成的影响，包括三号互连线对二号互连线的近端串扰 NEXT₁、远端串扰 FEXT₁、四号互连线对二号互连线的近端串扰 NEXT₂、远端串扰 FEXT₂。根据板级高速互连线结构的对称性，一号互连线与三号互连线的间距等于二号互连线与四号互连线的

间距，故三号互连线对一号互连线的远端串扰 FEXT₃ 等于四号互连线对二号互连线的远端串扰 FEXT₂。NEXT 的值等于 NEXT₁ 加 NEXT₂，FEXT 的值等于 FEXT₁ 加 FEXT₂，即 FEXT₁ 和 FEXT₃ 的和，NEXT₁、FEXT₁、NEXT₂ 和 FEXT₃ 的计算公式为：

$$NEXT_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{C_m}{C_{load}} + \frac{L_m}{L_0} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{Co_{23}}{Co_{22}} + \frac{Lo_{23}}{Lo_{22}} \right) \quad (3)$$

$$FEXT_1 = \frac{1}{2v_1} \frac{Len}{RT} \left(\frac{C_m}{C_{load}} - \frac{L_m}{L_0} \right) = \frac{\sqrt{(Co_{22} + Co_{23})(Lo_{22} - Lo_{23})}}{2} \frac{Len}{RT} \left(\frac{Co_{23}}{Co_{22}} - \frac{Lo_{23}}{Lo_{22}} \right) \quad (4)$$

$$NEXT_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{C_m}{C_{load}} + \frac{L_m}{L_0} \right) = \frac{1}{4} \left(\frac{Co_{24}}{Co_{22}} + \frac{Lo_{24}}{Lo_{22}} \right) \quad (5)$$

$$FEXT_3 = \frac{1}{2v_3} \frac{Len}{RT} \left(\frac{C_m}{C_{load}} - \frac{L_m}{L_0} \right) = \frac{\sqrt{(Co_{11} + Co_{13})(Lo_{11} - Lo_{13})}}{2} \frac{Len}{RT} \left(\frac{Co_{13}}{Co_{11}} - \frac{Lo_{13}}{Lo_{11}} \right) \quad (6)$$

设置传输线耦合区域的长度 L_{en} 为 3 inch，设置信号上升边 R_f 为 50 ps。针对板级高速互连线信号完整性的损耗问题，损耗 α_n 越小越好，其目标值是 0。分析一号互连线的损耗，计算公式为：

$$\alpha_n = \frac{1}{2} \left[\frac{Ro_{11} + \sqrt{f} Rs_{11}}{Z_{odd}} + Z_{odd} (Go_{11} + fGd_{11}) \right] \quad (7)$$

式中：频率 f 取为 5 GHz， Z_{odd} 是奇模阻抗。

所以，差模阻抗匹配、共模阻抗匹配、最小损耗、最小近端串扰和最小远端串扰组成板级高速互连线信号完整性优化的目标函数 $F(x)$ ，互连线的物理特征就是设计变量 x ，包括板级高速互连线的宽度 W 、差分对内间距 S_d 、差分对间间距 S_p 、层叠厚度 H 、层叠介电常数 D_k 和损耗因子 D_f ，计算公式为：

$$F(x) = \begin{cases} \min f_1(x) = |Z_{diff} - 100| \\ \min f_2(x) = |Z_{comm} - 25| \\ \min f_3(x) = \alpha_n \\ \min f_4(x) = |NEXT| \\ \min f_5(x) = |FEXT| \end{cases} \quad (8)$$

2 约束条件

设计变量 x 包括板级高速互连线的宽度 W 、差分对内间距 S_d 、差分对间间距 S_p 、层叠厚度 H 、层叠介电常数 D_k 和损耗因子 D_f ，生产工艺、性能要求和材料成本都是约束条件，需要约束以上参数的取值范围。

W 、 S_d 和 S_p 的最大值由设计者设定，但是在实际的工程应用中，应该把板材尺寸考虑在内。最小值受限于生产工艺和性能要求，由 PCB 板的生产厂家和设计者共同设定，这三个参数的约束是线性约束。设置 W 的取值范围为

3 ~ 10 mil, S_d 的取值范围为 3 ~ 10 mil, S_p 的取值范围为 3 ~ 20 mil。 H 、 D_k 和 D_f 的取值受限于 PCB 板厂家的生产工艺, 根据建滔板材 KB-6065F 型号和南亚板材 NP-155FB 型号的半固化片清单, 合计 46 种规格, 一种规格就对应着一组固定的 H 、 D_k 和 D_f 的数值, 这三个参数的约束是非线性约束。

3 实验结果

首先设置合理的种群规模、初始化个体和迭代次数。设置 300 个种群个体, 使用拉丁超立方采样对样本空间进行采样, 组成种群初始化的个体。设置 200 次迭代次数, 次数太多会导致计算量加大, 运算时间加长, 次数太小则不能优化到更好的结果。然后设置合理的变异概率、交叉概率和交叉长度。设置的变异概率和交叉概率太大会使得偶然性加大, 导致搜索失去方向, 设置的概率太小则会使得个体之间趋于一致性, 故合理的概率才能找到全局的最优解, 设置变异概率为 0.2, 交叉概率为 0.8。采用非支配排序遗传算法 III (NSGA-III)、推拉搜索算法 (PPS) 和 TIGE2 算法对板级高速互连线的宽度 W 、差分对内间距 S_d 、差分对间间距 S_p 和介电层参数四个物理特征进行优化, 故设置交叉长度为 4。在 NSGA-III 算法的迭代过程中, 将第 t 代产生的新种群 $Q(t)$ 与父代 $P(t)$ 合并组成 $R(t)$ 并进行非支配排序, 产生一系列非支配集 $F(t)$ 并计算到参考点的距离, 根据非支配分层和参考点距离, 依次向 $P(t+1)$ 填充非支配集 $F(t)$ ($t=1,2,3\cdots$)。NSGA-III 经过 200 代迭代之后, $|Z_{diff}-100|=6.736\ 2$, $|Z_{comm}-25|=0.049\ 2$, $\alpha_n=5.476\ 8$, $|NEXT|=0.011\ 9$, $|FEXT|=4.780\ 7\times 10^{-10}$, 求和等于 12.274 1。NSGA-III 的迭代过程如图 2 所示, 目标函数总和的迭代过程如图 2 中的 “min_value” 所示, 随着迭代过程的进行, 目标函数的总和逐渐收敛, 并且在迭代 40 次后趋于稳定。

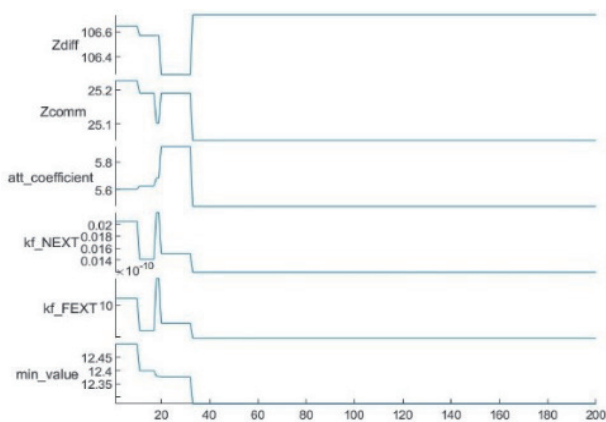


图 2 NSGA-III 的迭代过程

PPS 经过 200 代迭代之后, $|Z_{diff}-100|=7.334$, $|Z_{comm}-25|=0.0505$, $\alpha_n=4.974$, $|NEXT|=0.0215$, $|FEXT|=1.211\ 9\times 10^{-9}$, 求和等于 12.38。PPS 的迭代过程如图 3 所示, 目标函数总

和的迭代过程如图 3 中的 “min_value” 所示, 随着迭代过程的进行, 目标函数的总和逐渐收敛, 并且在迭代 100 次后趋于稳定。TIGE2 经过 200 代迭代之后, $|Z_{diff}-100|=7.222\ 1$, $|Z_{comm}-25|=0.069$, $\alpha_n=5.099\ 1$, $|NEXT|=0.018\ 3$, $|FEXT|=9.7463\times 10^{-10}$, 求和等于 12.408 5。TIGE2 的迭代过程如图 4 所示, 目标函数总和的迭代过程如图 4 中的 “min_value” 所示, 随着迭代过程的进行, 目标函数的总和逐渐收敛, 并且在迭代 80 次后趋于稳定。

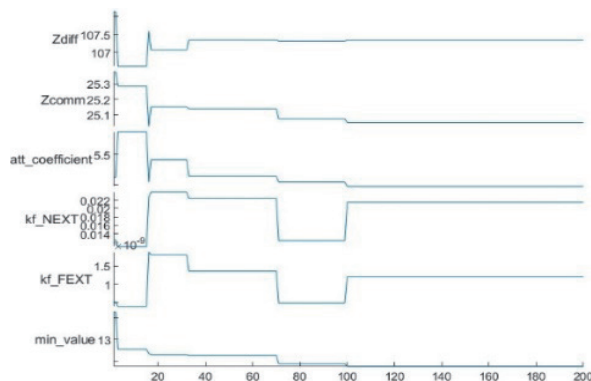


图 3 PPS 的迭代过程

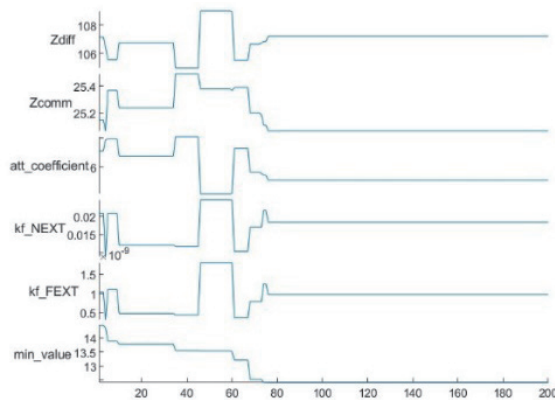


图 4 TIGE2 的迭代过程

建滔板材 KB-6065F 型号 1506 类型的成本不高, 是设计模拟电路 PCB 的常见板材类型, 选择本类型作为起始结构的板材, 查阅产品技术资料得到其介电层规格: 层叠厚度 H 是 6.8 mil、层叠介电常数 D_k 是 4.5、损耗因子 D_f 是 0.016。把经过优化的板级高速互连线的物理特征和目标函数与设置的起始结构比较, 分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 四种板级高速互连线的物理特征

物理特征	W/mil	S_d/mil	S_p/mil	板材类型	H/mil	D_k	D_f
起始结构	10	8.54	5.66	KB-6065F-1506	6.8	4.5	0.016
NSGA-III 优化结构	10	8.62	13.91	NP-155FB-2116MR	5.23	4.12	0.018
PPS 优化结构	10	4.47	20	KB-6065F-2116	5.4	4.4	0.016
TIGE2 优化结构	9.85	9.9	8.99	NP-155FB-2116MR	5.23	4.12	0.018

表 3 四种板级高速互连线的目标函数

目标函数	$ Z_{diff}-100 $	$ Z_{comm}-25 $	α_n	$ NEXT $	$ FEXT $	总和
起始结构	5.278 3	3.580 4	6.529 1	0.022 4	1.696×10^{-9}	15.410 2
NSGA-III 优化结构	6.736 2	0.049 2	5.476 8	0.011 9	$4.780 7\times10^{-10}$	12.274 1
PPS 优化结构	7.334	0.050 5	4.974	0.021 5	$1.211 9\times10^{-9}$	12.38
TIGE2 优化结构	7.222 1	0.069	5.099 1	0.018 3	$9.746 3\times10^{-10}$	12.408 5

4 分析

比较起始结构,除了差模阻抗匹配,三种遗传算法优化过后结构的共模阻抗匹配、损耗、近端串扰和远端串扰的数值更低或者更接近于理想值,板级高速互连线的信号完整性性能更好,三种遗传算法都可以用于处理板级高速互连线的物理特征优化问题。NSGA-III优化结构的 Z_{comm} 更接近 $25\ \Omega$,比较起始结构, $|Z_{comm}-25|$ 减小 $3.531\ 2\ \Omega$, α_n 减小 16.12% , $|NEXT|$ 减小 45.88% , $|FEXT|$ 减小 71.81% ;PPS优化结构的 $|Z_{comm}-25|$ 减小 $3.529\ 9\ \Omega$, α_n 减小 23.82% , $|NEXT|$ 减小 4.02% , $|FEXT|$ 减小 28.54% ;TIGE2优化结构的 $|Z_{comm}-25|$ 减小 $3.511\ 4\ \Omega$, α_n 减小 21.9% , $|NEXT|$ 减小 18.3% , $|FEXT|$ 减小 42.53% 。

比较三种遗传算法优化过后的结构,除了损耗,NSGA-III优化算法的共模阻抗匹配、近端串扰和远端串扰的减小幅度均比PPS优化算法和TIGE2优化算法的幅度大,优化过后的数值更低或者更接近于理想值。

5 结语

本文对于板级高速互连线的物理特征进行优化,分析本次优化是多目标的优化问题,介绍多目标优化问题的目标函数和约束。采用非支配排序遗传算法III(NSGA-III)、推拉搜索算法(PPS)和TIGE2算法对板级高速互连线的宽度 W 、差分对内间距 S_d 、差分对间间距 S_p 和介电层参数等物理特征进行优化。对比优化前起始结构的目标函数和三种遗传算法优化结构的目标函数,三种遗传算法都可以用于处理板级高速互连线的物理特征优化问题。其中NSGA-III优化结构的目标函数总和最小,算法的运算时间较短,在实际的工程设计中更具备指导意义。

参考文献:

[1] WG-ETHERNET Working Group. IEEE standard for ethernet—amendment 10: media access control parameters, physical layers, and management parameters for 200 Gb/s and 400 Gb/s operation[EB/OL].(2017-11-12)[2023-12-01].https://

ieeexplore.ieee.org/document/8207825.

[2] BOGATIN E. Essential principles of signal integrity[J]. IEEE microwave magazine, 2011, 12(5): 34-41.
[3] ISO/IEC/IEEE International Standard - Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 3: Standard for Ethernet AMENDMENT 10: Media access control parameters, physical layers, and management parameters for 200 Gb/s and 400 Gb/s operation:ISO/IEC/IEEE 8802-3:2021[S/OL].[2023-11-20].https://www.iso.ostandard/78299.html.
[4] KIM H, SUI C, CAI K, et al. An efficient high-speed channel modeling method based on optimized design-of-experiment (DoE) for artificial neural network training[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2018, 60(6): 1648-1654.
[5] 黄中铠,梁卓灏,杨其宇.基于W-ElementRLGC矩阵的板级高速互连线实用建模方法[J].电子技术,2023,52(2): 28-31.
[6] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2014, 18(4): 577-601.
[7] FAN Z, LI W, CAI X, et al. Push and pull search for solving constrained multi-objective optimization problems[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 44(2): 665-679.
[8] ZHOU Y, ZHU M, WANG J, et al.Tri-Goal Evolution Framework for Constrained Many-Objective Optimization[J]. In IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems, 2020, 50(8): 3086-3099.
[9] BALANIS C A. Advanced engineering electromagnetics[M]. Honoken: John Wiley & Sons, 2012.
[10] 曾浪芸.基于板级设计的高速信号传输模型研究[D].中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所),2020.
[11] 曾爱凤,王海鹏.板级互连线的串扰规律研究与仿真[J].电子测量技术,2010,33(8):9-12+17.

【作者简介】

梁卓灏(1999—),男,广东人,硕士,研究方向:电子系统建模和优化。

杨其宇(1977—),男,广东人,博士,副教授,研究方向:智能控制与数字信号处理。

(收稿日期:2023-12-27)