

基于多目标优化的高速 PCB 信号完整性设计与实现

冯国庆

天津瑞源电气有限公司 天津

【摘要】高速电路系统中，信号完整性直接影响数据传输的稳定性与电磁兼容性能。为应对走线延时、串扰和阻抗不匹配等复杂问题，引入多目标优化方法对 PCB 设计进行系统化建模与求解。通过建立涵盖延时、反射系数及串扰抑制的综合评价指标，并结合智能优化算法搜索设计空间，实现设计变量的全局优化配置。该方法有效平衡了信号质量与布线复杂度，在提升高速信号传输可靠性的同时降低了设计迭代成本，为高性能电路系统提供了高效的设计途径。

【关键词】高速 PCB；信号完整性；多目标优化；串扰抑制；智能算法

【收稿日期】2025 年 8 月 23 日 **【出刊日期】**2025 年 9 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250220

High speed PCB signal integrity design and implementation based on multi-objective optimization

Guoqing Feng

Resource Electric Tianjin Ltd, Tianjin

【Abstract】In high-speed circuit systems, signal integrity directly impacts data transmission stability and electromagnetic compatibility. To address complex issues such as trace delays, crosstalk, and impedance mismatch, this study introduces a multi-objective optimization method for systematic modeling and solving in PCB design. By establishing comprehensive evaluation metrics that encompass delay, reflection coefficient, and crosstalk suppression, combined with intelligent optimization algorithms to explore design spaces, the method achieves global optimization of design variables. This approach effectively balances signal quality with routing complexity, enhancing high-speed signal transmission reliability while reducing design iteration costs. It provides an efficient design pathway for high-performance circuit systems.

【Keywords】High-speed PCB; Signal integrity; Multi-objective optimization; Crosstalk suppression; Intelligent algorithm

引言

高速电路设计正面临信号频率不断提升带来的挑战，细微的布线差异都可能引发严重的完整性问题。随着系统集成度和数据速率的持续提高，传统的经验式设计已难以满足对高速 PCB 性能的严格要求。如何在有限的布线空间内同时兼顾延时控制、阻抗匹配和串扰抑制，成为设计过程中的关键难点。多目标优化方法为这一难题提供了新的思路，其在处理非线性、多约束问题上展现出显著优势。通过将信号完整性关键参数转化为优化目标，可实现对复杂设计方案的科学探索，从而在效率与可靠性之间取得平衡。

1 高速 PCB 信号完整性面临的主要挑战与设计

难点

高速 PCB 设计在信号传输速度不断提升的背景下，面临极其严峻的完整性问题。随着电路频率达到吉赫兹乃至更高的范围，电磁波效应在导线中的传播特性被显著放大，任何细微的几何偏差都可能导致阻抗不连续，进而产生严重的反射和信号畸变。在复杂多层板结构中，高速信号线与电源网络之间的电磁耦合更加突出，导致电磁干扰与串扰问题频繁出现^[1]。高速 PCB 往往需要在有限的板层和布线空间中满足严格的时序约束和同步要求，这使得走线延时、跨层过孔引入的寄生效应以及地弹噪声等因素成为影响整体性能的核心挑战。

在高速信号完整性设计过程中，传统的经验式

布线方法逐渐暴露出不足。随着系统规模扩大和器件数量增加,设计者难以通过直观判断来全面兼顾阻抗控制、时延匹配和串扰抑制。高速 PCB 信号传输不仅涉及时域和频域的复杂耦合,还受到工艺公差、温度漂移和材料介电常数变化的影响,使得电磁兼容性问题日益突出。为了保证高速链路的可靠性,必须在布线阶段对传输路径的连续性进行严格控制,同时对关键信号线进行长度补偿和差分设计,以降低反射与相位失配的风险。信号完整性问题不仅是单一因素造成的结果,而是多维度约束共同作用下的综合性难题。

高速 PCB 的设计难点还体现在优化目标之间的矛盾关系。缩短信号路径有助于降低延时,但过于紧凑的布线会增加串扰风险;提高阻抗匹配精度需要精细化走线与叠层控制,却可能加大工艺复杂度与成本。多层高速板中,不同信号线对的空间分布必须同时兼顾互连性能与制造可行性,这使得设计问题呈现出多目标、多约束的特性^[2]。在这种背景下,仅依赖传统单目标优化策略无法实现信号完整性的全面提升。如何在延时控制、串扰抑制和阻抗匹配之间取得平衡,成为高速 PCB 设计与实现中亟待解决的关键问题。

2 多目标优化在信号完整性建模中的方法与优势

在高速 PCB 信号完整性设计过程中,多目标优化方法能够突破传统单一性能指标约束的局限,将复杂电磁环境下的多种设计需求转化为可量化的数学模型。信号完整性问题涉及延时控制、阻抗匹配、串扰抑制和功耗分布等多个方面,每一个指标都与布线拓扑、叠层结构和介质参数密切相关^[3]。通过建立多目标优化模型,可以在设计初期将这些性能指标作为目标函数,同时引入加工工艺约束与材料限制条件,从而将高速 PCB 的设计问题转化为多维度的优化求解任务。

在建模过程中,多目标优化方法借助仿真工具和数值分析手段,对高速信号传输的物理机理进行精确刻画。通过时域反射分析、频域 S 参数计算以及电磁场仿真,可以获得延时、反射系数、眼图开口度和串扰电平关键评价参数,并将其映射为优化目标。不同于单目标优化仅追求局部最优解,多目标优化能够构建帕累托最优解集,为设计者提供多

种可行方案。这种建模方式不仅考虑到信号路径的电气连续性,还兼顾制造公差与热效应的影响,使得优化结果更贴近实际应用需求。在这一过程中,算法与仿真平台形成耦合,使设计方案能够在虚拟环境中不断迭代和验证,显著提高了优化的精度和可靠性。

多目标优化在信号完整性建模中的优势还体现在对全局设计空间的探索能力。传统方法往往依赖人工经验进行局部调整,容易陷入设计瓶颈,而基于多目标优化的模型能够通过遗传算法、粒子群优化或差分进化算法等智能优化技术,对庞大的设计空间进行全局搜索。通过对比不同解集的性能分布,可以在保持信号传输质量的同时兼顾布线复杂度和成本控制^[4]。尤其是在高密度互连与高速接口并存的 PCB 设计中,多目标优化能够显著降低设计迭代次数,提高信号完整性与系统稳定性。这种优势不仅提升了整体设计效率,还使高速 PCB 在面对复杂应用场景时具备更强的鲁棒性与可扩展性。

3 基于优化算法的高速 PCB 设计实施与关键技术

在高速 PCB 信号完整性设计中,优化算法的引入为复杂互连结构的建模与实现提供了有效途径。随着数据速率不断提升,单纯依赖人工经验进行布线与叠层设计已难以满足对信号完整性的严格要求。优化算法通过对设计变量进行编码与搜索,可以在庞大的解空间中找到更优的布线策略与拓扑结构^[5]。遗传算法以其种群进化和适应度选择机制在高速 PCB 设计中得到了广泛应用,能够在阻抗控制、走线长度平衡以及串扰抑制等多目标下形成均衡解集。粒子群优化则通过模拟群体智能行为,实现快速收敛与全局搜索的结合,适合在大规模布线与差分信号设计中提升效率。不同优化算法在应用中各具特点,通过灵活组合可以实现更高效的信号完整性优化。

在具体实施过程中,优化算法与电磁仿真平台的耦合起到了核心作用。高速 PCB 设计不仅需要优化信号路径,还必须考虑叠层介质参数、过孔模型以及电源完整性等因素。通过建立仿真—优化联合框架,可以在每一次迭代中调用时域反射、S 参数和眼图分析,实时评估设计方案的性能指标。优化算法利用这些反馈结果不断调整布线规则与结构配置,

使优化过程能够动态收敛到更符合工程需求的解集。差分进化算法在处理高维约束优化问题时展现出显著优势, 可以针对高速接口的时序一致性和阻抗连续性进行精细化调优, 而模拟退火算法则有助于避免陷入局部最优, 确保布线方案具备更强的全局鲁棒性。

优化算法在高速 PCB 实现中的关键技术还包括多目标解的筛选与工程可行性验证。优化过程中产生的帕累托最优解集往往包含大量候选方案, 如何在保证信号完整性的同时兼顾布线复杂度、加工工艺和成本控制, 成为关键环节。利用启发式规则与约束筛选, 可以将优化解集进一步缩小到可制造性较高的方案范围。为了提高设计的可实施性, 需要在优化结果中引入差分布线、参考平面连续性和过孔建模等工程约束, 并在后期通过硬件测试验证仿真结果的有效性^[6]。这一系列关键技术的协同应用, 不仅保证了高速信号传输的稳定性与可靠性, 也大幅缩短了设计周期。在多目标优化与智能算法的支持下, 高速 PCB 信号完整性设计逐渐形成了一种集理论建模、算法实现与工程验证为一体的系统化方法, 为高性能电子系统提供了强有力的设计保障。

4 多目标优化方法对信号完整性提升的效果与应用价值

多目标优化方法在高速 PCB 信号完整性设计中的应用显著改变了传统的设计思路, 使得设计结果能够在多个维度上同时取得良好平衡。通过对时延、阻抗连续性、串扰抑制以及眼图开口度等关键指标的联合优化, 信号传输的稳定性得到了系统性提升^[7]。在高速互连结构中, 过孔引入的寄生电容与寄生电感会对高速信号造成严重畸变, 而多目标优化能够在建模阶段将这些因素纳入约束条件, 并通过全局搜索实现结构配置的优化, 从而有效降低反射与失真。优化方法在信号路径规划中还能够显著提升差分走线的一致性, 确保高速通道具备更强的抗干扰能力, 最终形成可靠的信号完整性保障体系。

在实际工程应用中, 多目标优化的优势不仅体现在信号质量的改善, 还表现在设计效率的提升和成本的控制。高速 PCB 设计往往涉及数以百计的信号网络和复杂的多层结构, 传统手段需要大量迭代才能完成符合要求的布线。借助智能优化算法, 可以在较短时间内生成多组帕累托最优解集, 为设计

者提供多样化的选择。通过对比不同解集在性能与可制造性之间的差异, 能够快速筛选出既满足高速信号传输要求, 又兼顾布线密度与工艺限制的方案。这种方式有效缩短了项目开发周期, 减少了因反复修改造成的设计开销, 使得高速 PCB 设计更具经济性和可操作性。

多目标优化在信号完整性提升方面的应用价值还体现在其对新兴领域的支撑作用。随着 5G 通信、人工智能加速器和高性能计算平台的兴起, 高速 PCB 必须承载更高带宽、更低延时的传输需求。多目标优化方法通过算法与仿真的耦合, 为这些高性能系统提供了强大的设计工具, 不仅能够在高速通道中实现低抖动和低误码率, 还能在高密度封装环境下维持良好的电磁兼容性^[8]。通过在工程实践中的验证, 优化结果展现出较高的一致性和鲁棒性, 确保设计方案能够在复杂应用场景下稳定运行。

5 结语

多目标优化方法在高速 PCB 信号完整性设计中展现出独特优势, 其综合建模与智能算法的结合有效缓解了延时、阻抗不匹配与串扰等复杂问题。优化过程不仅提升了信号传输的稳定性与可靠性, 还在布线复杂度和设计周期之间实现了平衡。工程验证表明, 该方法能够兼顾性能与成本控制, 为高速电路系统提供了可行的解决路径。随着高速互连需求不断增强, 这一思路已成为推动 PCB 设计水平提升的重要手段。

参考文献

- [1] 王雷, 郭宇荣, 高峰, 等. 基于超启发式算法的地下金属矿山多目标工序调度优化[J/OL]. 矿产保护与利用, 2025, (04): 60-70.
- [2] 何富春, 符纯明, 宗奔阳, 等. 基于多目标优化算法的拉棒磨损工艺参数优化设计[J/OL]. 核动力工程, 1-10.
- [3] 陈媛. 一种无参考回流平面模型的信号完整性仿真方法探究[J]. 中国集成电路, 2025, 34(08): 50-55.
- [4] 张军萍, 徐升. 高速线缆信号完整性仿真优化与参数影响探究[J]. 电线电缆, 2025, 68(07): 33-39.
- [5] 杜亚红. 通信电缆的电磁兼容性与信号完整性分析[C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 重庆建筑编辑部, 重庆市建筑协会. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论

- 文集(一).兰州众邦电线电缆集团有限公司;,2025:219-223.
- [6] 雷川,雷璐娟,涂逊,等.背钻控制对高频高速 PCB 信号传输的影响研究[J].印制电路信息,2024,32(S2):35-42.
- [7] 陈辉.高速互连 PCB 的材料电磁表征方法研究[J].环境技术,2024,42(06):120-124.
- [8] 雷璐娟,雷川,曹磊磊,等.铜箔粗糙度对高速高频 PCB 信号传输的影响研究[J].印制电路信息,2024,32(S1):19-27.
- 版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
-  **OPEN ACCESS**