

文章编号: 1672-8785(2024)05-0028-11

基于电磁仿真的红外成像 电路板优化设计

马文怡谷 苏俊波 杨 波 张 鹏 刘 鹏 杨景超 杨镇豪

王 菲 赵桂美 廖邦繁 李 根 张昱东

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘 要: 致力于通过仿真技术对红外成像电路板(Printed Circuit Board, PCB)进行优化, 以提高其抗电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)能力。基于 ANSYS SIWAVE 仿真平台, 聚焦于识别并解决 PCB 在电磁环境中可能面临的问题, 以提高系统的可靠性和性能。首先, 通过对 PCB 进行模态分析和频域分析, 识别了潜在的谐振频率和电磁辐射点。接着, 通过添加去耦电容的方式来消除该谐振频点, 再通过对高速信号过孔孔径的仿真研究, 调整布线方案、优化信号传输路径并对关键信号线进行保护, 降低了信号失真和时序问题的风险。仿真结果表明, 这些优化措施在提高 PCB 性能和稳定性方面取得了显著的效果。

关键词: 红外成像; 电磁干扰; 电路板; ANSYS SIWAVE

中图分类号: TN22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.05.004

Optimized Design of Infrared Imaging Circuit Board Based on Electromagnetic Simulation

MA Wen-yigu, SU Jun-bo, YANG Bo, ZHANG Peng, LIU Peng, YANG Jing-chao, YANG Zhen-hao,

WANG Fei, ZHAO Gui-mei, LIAO Bang-fan, LI Gen, Zhang Yu-dong

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: This research is devoted to optimizing PCB with simulation technology to improve its anti-electromagnetic interference ability. Based on the ANSYS SIWAVE simulation platform, we focus on identifying and solving problems that PCB may face in electromagnetic environments to improve system reliability and performance. First, the potential resonant frequencies and electromagnetic radiation points are identified through the modal analysis and frequency domain analysis of PCB. Then, the resonant frequency point is eliminated by adding decoupling capacitors. The wiring scheme is adjusted, the signal transmission path is optimized, and the key signal lines are protected by simulation research on the high-speed signal aperture, which reduces the risk of signal distortion and timing problems. The simulation results show that these optimization measures have achieved remarkable results in improving PCB performance and stability.

Key words: infrared imaging; EMI; PCB; ANSYS SIWAVE

收稿日期: 2023-12-18

作者简介: 马文怡谷(1997-), 女, 云南昆明人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为红外成像电路硬件设计。E-mail: 1982747324@qq.com

0 引言

红外成像电路主要包含信号放大电路、滤波电路、信号处理电路、图像生成算法、控制和接口模块、电源管理模块、数据存储和传输模块等。红外成像电路的这些部分共同协作,使系统能够探测红外辐射、处理信号并生成可见图像。在红外成像系统中,数据传输和信号处理往往涉及到高频信号。这些高频信号的传输路径可能成为 EMI 的传播途径。电源线和信号线在 PCB 上布局,可能充当天线,使得电磁辐射能够进入或离开电路。EMI 可能导致红外成像系统中的信号质量下降,从而影响生成的红外图像的清晰度和准确性。

数字化技术和高频技术的广泛应用使得电子设备更加复杂,同时也更容易受到 EMI 的影响。这些电磁源产生的辐射和信号在空间中相互叠加,形成一个复杂而多变的电磁环境^[1]。在这个环境中,电子设备不仅需要能够正常工作,而且还需要具备一定的抗干扰能力。抗 EMI 措施是确保设备在复杂的电磁环境中正常运行的重要因素。本文借助仿真手段,对现有的红外成像 PCB 进行布线后仿真,并根据仿真结果进行局部优化设计,以提高电路性能、减小潜在风险;同时也为以后的红外成像 PCB 设计提供一些指导性意见。

1 红外成像 PCB 抗 EMI 设计的必要性

红外成像 PCB 是电路元件的载体,也是电子元器件之间电气连接的关键部分。因此,PCB 需要采取相应的抗 EMI 措施^[2]。

红外成像 PCB 上的导线、走线等电路元件可能会成为天线,产生电磁辐射。通过采用合适的布局和屏蔽措施,可以减少或阻止这些辐射,避免对其他设备或系统产生不良影响^[3]。

红外成像 PCB 包含对 EMI 敏感的电路,如信号放大电路、信号处理电路、图像传输电路等。通过合理的 PCB 设计,可以减少这些敏感电路受到外部电磁噪声的影响,提高

设备的可靠性和性能^[4-5]。

红外成像 PCB 上不同电路之间可能存在信号串扰的问题,即一个电路的信号影响到其他电路。通过适当的布局、屏蔽和隔离,可以减少信号串扰,确保各个电路之间相互独立运行。

同时,PCB 的电路元件也会受到外部 EMI 的影响,导致设备性能下降或故障。EMI 可能造成设备性能不稳定,甚至损坏电子元器件。通过在 PCB 上采取抗 EMI 措施,可以提高设备的可靠性,降低故障率,延长设备寿命^[6]。

本文采用的 ANSYS SIWAVE 电磁仿真软件在板级电磁仿真中有以下几个优点:

(1)提供了广泛的电磁仿真功能,包括导频分析、时域分析、频域分析、S 参数分析等。

(2)可以模拟和分析 PCB 上的电磁场分布与电压分布,帮助工程师了解信号和电源的传播路径以及潜在的 EMI 源和敏感区域。

(3)支持导频分析和时域仿真,可以对高频和脉冲信号进行详细的分析。这对于处理高速电路和快速信号变化的情况非常有帮助。

(4)可用于进行 SI/PI 分析,包括信号完整性、电源完整性和时钟分析。这对于确保设计的稳定性和性能至关重要。

(5)SIWAVE 与其他 ANSYS 工具(如 ANSYS HFSS、ANSYS Q3D Extractor 等)无缝集成,便于设计师在电子产品设计的各个阶段都能对产品的电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility, EMC)进行设计仿真,从而优化产品性能。

综上所述,该软件非常适合本文对 PCB 电磁性能优化的需求,也方便后续更进一步的研究。

2 红外成像 PCB 的优化处理

本次仿真的 PCB 是用于红外成像的处理板,其中涵盖了信号处理、通讯、图像输出等多个功能模块。希望尽可能将仿真结果有效地

应用到工程实践上。

2.1 PCB 关键信号走线的电磁敏感度

EMC 是指设备或系统在电磁环境中符合要求运行时不对其环境中的任何设备产生无法忍受的电磁干扰的能力。因此, EMC 包括两个方面的要求: 一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的 EMI 不能超过一定的限值; 另一方面是指设备对所在环境中存在的 EMI 具有一定程度的抗扰度, 即电磁敏感性 (Electromagnetic Susceptibility, EMS)。

计算平面波以某一特定角度入射并具有特定极化时在板上产生的感应电压。根据仿真得到的感应电压幅度及频点结果图, 我们可以分析易受干扰的频点及干扰程度。结合红外成像

电路原理, 探测器探测到目标物体发出的或反射的红外辐射后, 将其转换为微弱的电信号并输出到信号处理模块。这些信号包含关键信息, 但又由于信号小而极易受到干扰, 因此在 PCB 投板前对敏感电路网络进行 EMS 评估和优化, 可以大大减小后期测试风险和代价。

图 1 为关键信号走线 PCB 图, 图 2 为具有极化方向的平面波入射后在该信号走线上产生的感应电压及对应的频率图。可以看出, 在 PCB 某一段的信号走线极易受到外界电磁辐射的干扰。由于电子设备工作在一个复杂的电磁环境中, 根据仿真结果我们应适当在此段对该信号进行保护处理。

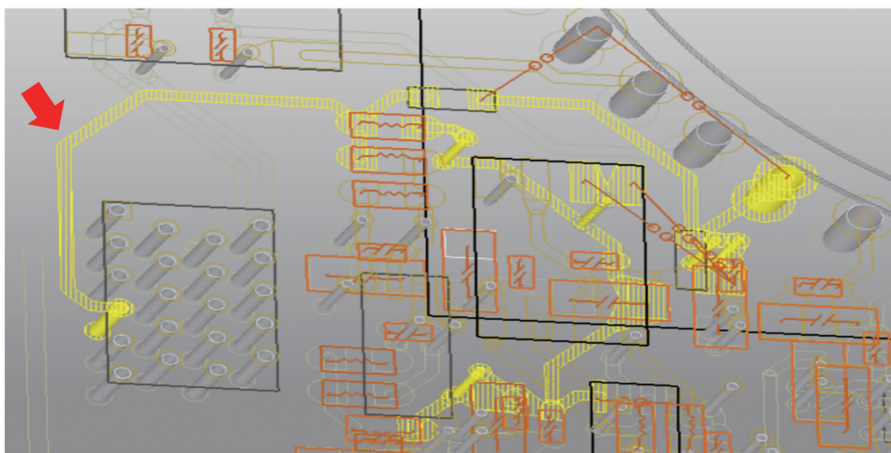


图 1 关键信号走线 PCB 图

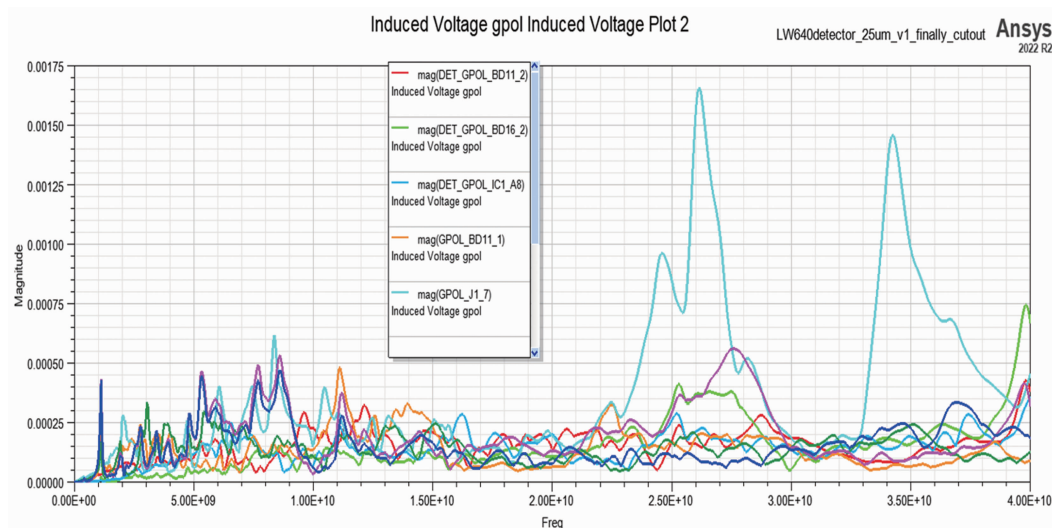


图 2 关键信号走线感应电压幅值图

因此我们考虑在信号走线附近的同一走线层添加两条地线, 仿真结果如图 3 所示。可以看出, 产生的干扰电压的幅值比之前减小了 50%, 也进一步证明了该方法可以增强信号对电磁辐射的抗干扰能力。

2.2 PCB 模态分析

谐振仿真分析是为了评估电路中可能发生的谐振现象, 从而优化电路设计以避免潜在的问题。谐振可能会导致电路性能降低、EMI、信号失真等问题。

当走线通过谐振较强的区域时, 信号相当于走在一个浮动的参考平面, 信号完整性会变差; 若走线在此区域过孔, 且所形成的有效长度正好是谐振频点的 $1/4$ 波长, 则容易形成天

线并在近场带出该谐振频点^[3]。

本文中 PCB 设置的扫描范围为 $1 \sim 800$ MHz, 1 MHz 以下为电源设计保障, 各信号速率包含 20 MHz、 65 MHz、 800 MHz 等, 因此关注 800 MHz 以下的谐振情况(见图 4)。

当发生谐振的区域不是很大时, 我们可以采用在谐振处并联去耦电容的方法来加以优化。去耦电容是一种用于电路的电容器, 其主要作用是提供瞬态电流, 以满足电子器件在瞬时工作状态下的能量需求。它在电源和地之间连接, 用于吸收电源线上的高频噪声、瞬态波动以及其他 EMI, 从而保持电源电压的稳定性, 减少电路中的电源纹波, 提高系统的稳定性和性能。

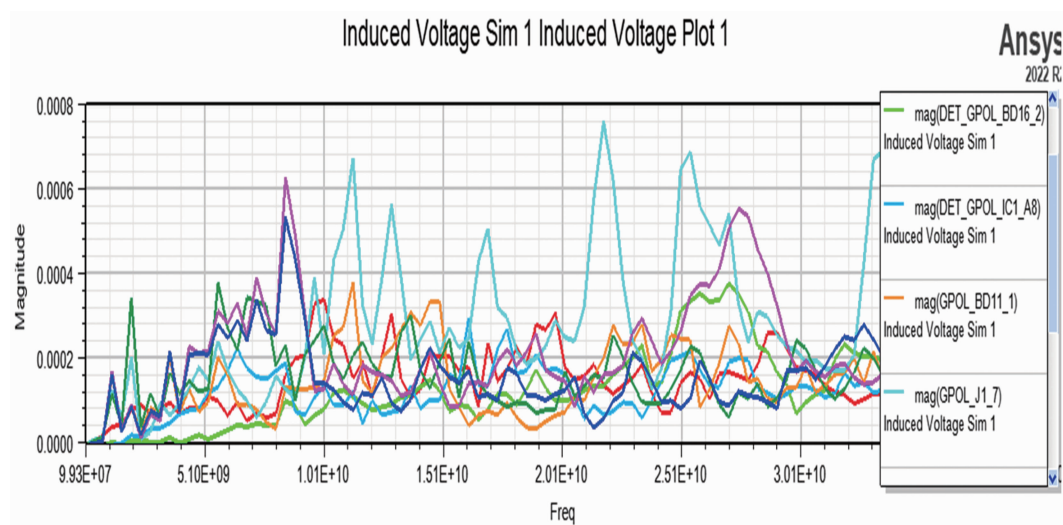


图 3 关键信号走线感应电压幅值图(改善后)

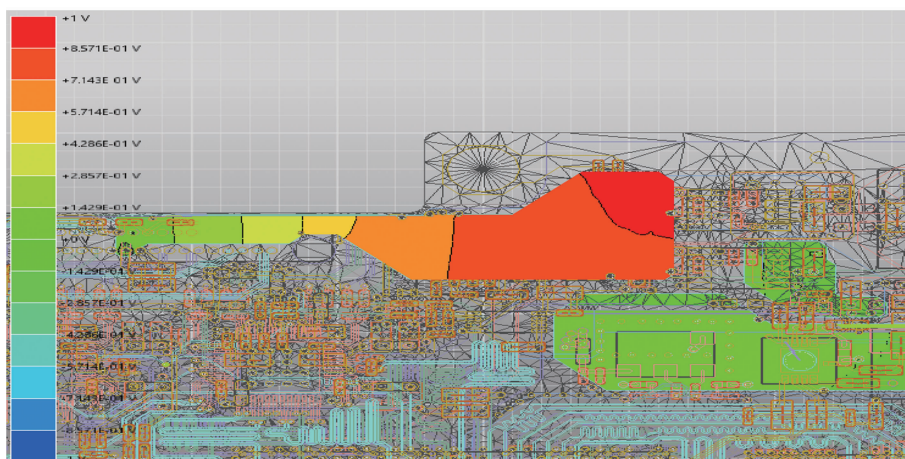


图 4 谐振分析模态图

表 1 列出了常用封装电容的 ESL 估算值。可以看出,不同封装的电容器有不同的 ESL 值(单位为 nH)。可根据式(1)与式(2)计算去耦电容^[5]。并联去耦电容后的谐振分析模态图如图 5 所示。

$$L_{PCB} = 5.08h \left[\ln \left(\frac{4h}{d} + 1 \right) \right] \times 10^{-9} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{\omega^2 (ESL + L_{PCB})} \quad (2)$$

式中, L 的单位为 H; h 为封装电容的过孔长度(实际等于厚度); d 为孔径, 单位为 in。

表 1 常用封装电容的 ESL 估算值

封装	ESL/nH
0402	0.4
0603	0.5
0805	0.6
1206	1
1210	0.9
1812	1.4
2220	1.6

2.3 PCB 走线与板边的距离对信号的影响

在布线过程中,针对关键敏感信号,我们要着重保护,避免其跨区或者临近高频率信号,但往往容易忽略走线与板边的距离对信号抗 EMI 能力的影响。图 6 所示为 1 kHz~100 MHz 的空间磁场干扰情况下,同一走线与板

边距离为 0.6 mm 与 1.5 mm 时所产生的干扰电压。图 7 所示为 1 kHz~1 GHz 的空间磁场干扰情况下,同一走线与板边距离为 0.6 mm 与 1.5 mm 时所产生的干扰电压。

仿真结果显示,走线与板边距离为 0.6 mm 时会比 1.5 mm 时产生更大的感应电压,可能导致辐射干扰增加,从而降低信号的质量。尤其当外界的磁场分布为高频分量时,信号走线上产生的干扰越显著。除此之外,在器件布局密集、信号走线很难再加大离板边的距离时,可以增加相邻层地平面的面积,使其将该信号覆盖在内,也可以提升其抗干扰的性能(见图 8)。

2.4 PCB 过孔尺寸对信号的影响

过孔尺寸是 PCB 设计中至关重要的因素之一,直接影响着整个系统的性能。首先,对于 EMI 而言,过孔大小的选择在很大程度上决定了电磁辐射和传导的水平。此外,过孔的大小会影响阻抗的匹配。在红外成像电路中,图像输出模块信号具有频率高、速度快等特点,确保过孔的阻抗与周围环境匹配至关重要,以保持信号完整性^[3]。基于仿真软件及现有的红外成像 PCB,我们可以分析孔径大小、焊盘尺寸对信号的影响。以有过孔的一组差分高频信号为例,改变过孔的大小可能对信号传

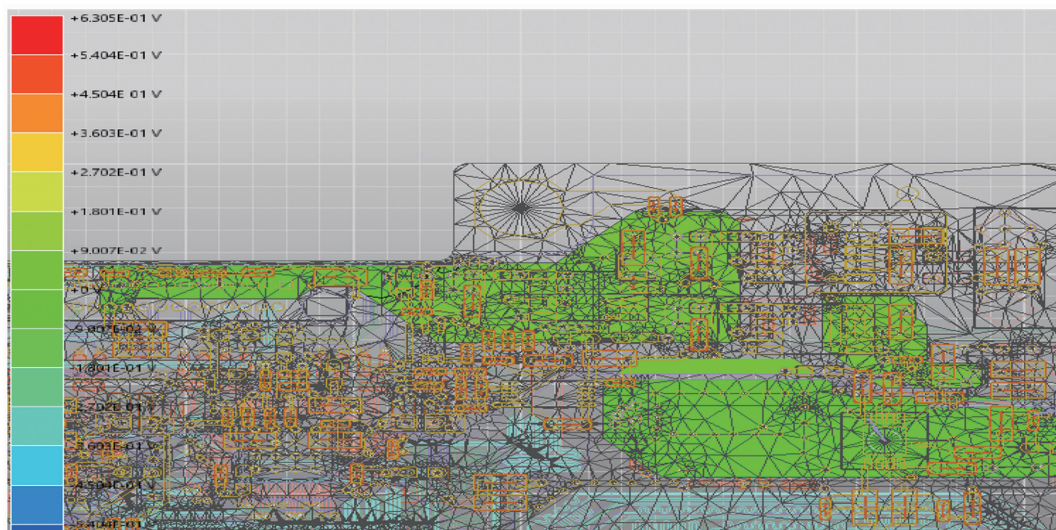


图 5 并联去耦电容后的谐振分析模态图



图 6 1 kHz~100 MHz 的空间磁场干扰情况下, 同一走线与板边距离为 0.6 mm 与 1.5 mm 时所产生的干扰电压

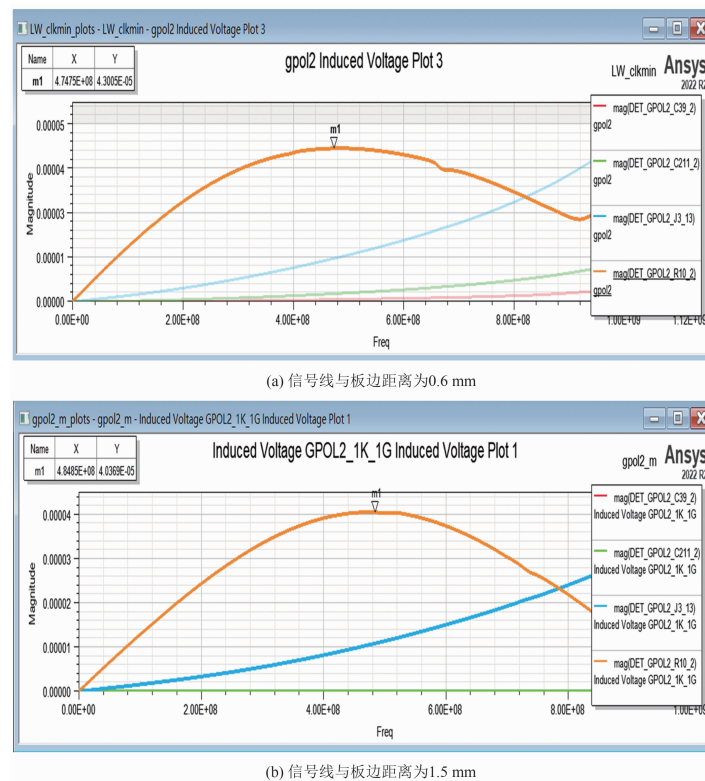


图 7 1 kHz~1 GHz 的空间磁场干扰情况下, 同一走线与板边距离为 0.6 mm 与 1.5 mm 时所产生的干扰电压

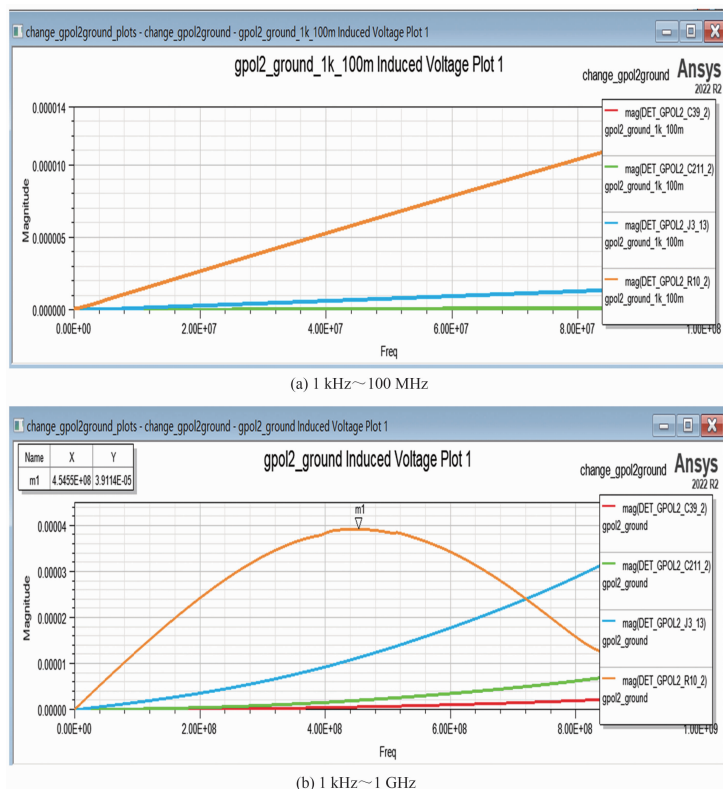


图 8 抗干扰性能

输带来影响。本文主要从时域反射分析(Time Domain Reflectometry, TDR)曲线、眼图、回波损耗三方面进行研究。

TDR 是一种用于测量传输线上信号传输性质的工具。通过 TDR, 我们可以获得关于电缆、传输线或其他导体结构中的反射和传输特性的信息。当阻抗不匹配时, 信号到达接收端后, 一部分信号可能会反射回原始的传输线, 导致信号衰减和失真, 甚至出现波形的上下过冲^[2]。图 9 所示为不同孔径大小以及不同焊盘大小的过孔的 TDR 曲线。

通过对比可以看出, 焊盘的尺寸、钻孔的大小会在信号传输过程中有不同的阻抗变化。本文的仿真模型建立在固定的层叠结构上, 所以过孔的长度一致为 0.1 mm。

针对本文的模型可以看出, 孔径为 0.2 mm 且焊盘直径为 0.4 mm 的过孔尺寸在信号传输过程中的阻抗变化是最明显的。

其次, 眼图是一种直观的信号质量评估工具。通过观察眼图的形状和开放程度, 可以迅速判断信号的完整性、稳定性以及受到的噪声

和抖动水平。一个清晰、开放的眼图表示信号的质量较好, 而模糊或闭合的眼图可能暗示存在问题。图 10 所示为相同信号经过不同孔径大小以及不同焊盘大小的过孔的眼图。

通过对比可以看出, 焊盘的大小对信号的传输质量影响较小, 但是钻孔的大小对信号的传输质量有着显著的影响。尤其在高速信号中, 钻孔孔径越大, 信号在传输过程中越不稳定。

回波损耗是指信号从一个系统、设备或传输线上反射回来时的损耗程度。它通常以分贝(dB)为单位, 表示反射信号的强度与输入信号的强度之间的差异。回波损耗的计算公式为^[4]

$$R_L = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

式中, R_L 表示回波损耗, V_1 表示输入信号电压, V_2 表示反射信号电压。又因为两电压方向相反, 负号表示其方向。数值越大, 信号反射越小, 说明阻抗越匹配。图 11 所示为不同过孔的回波损耗。

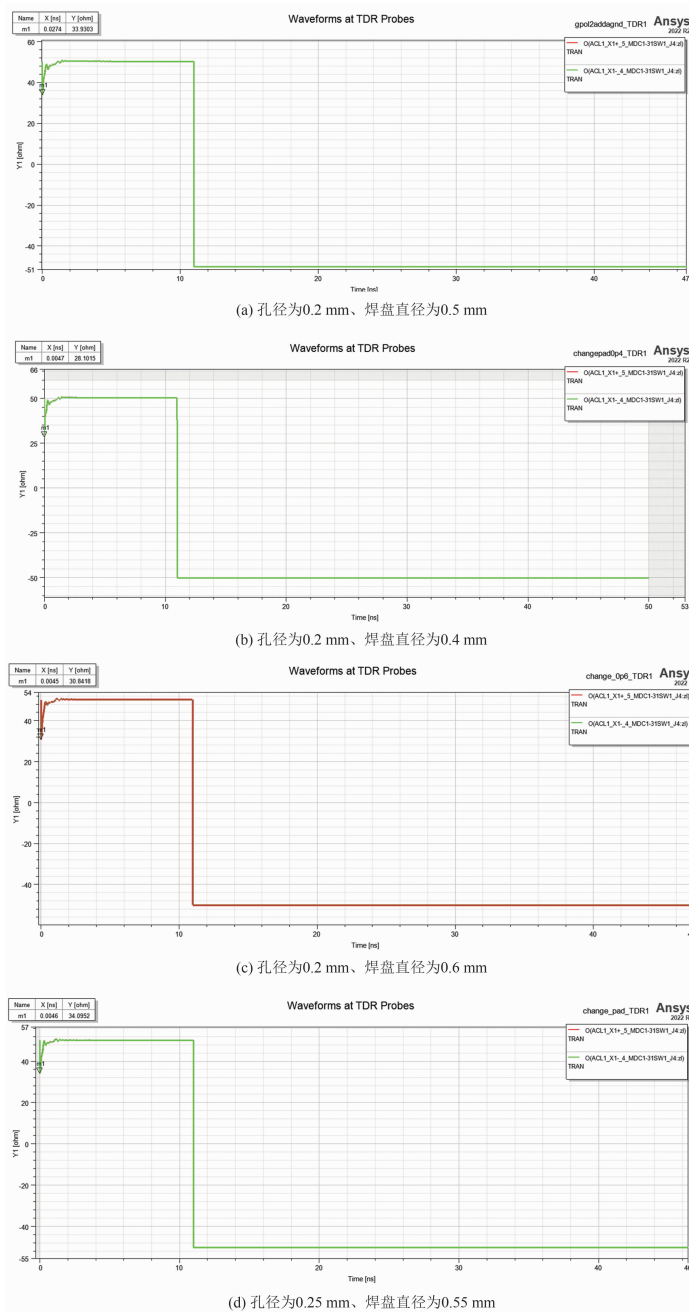


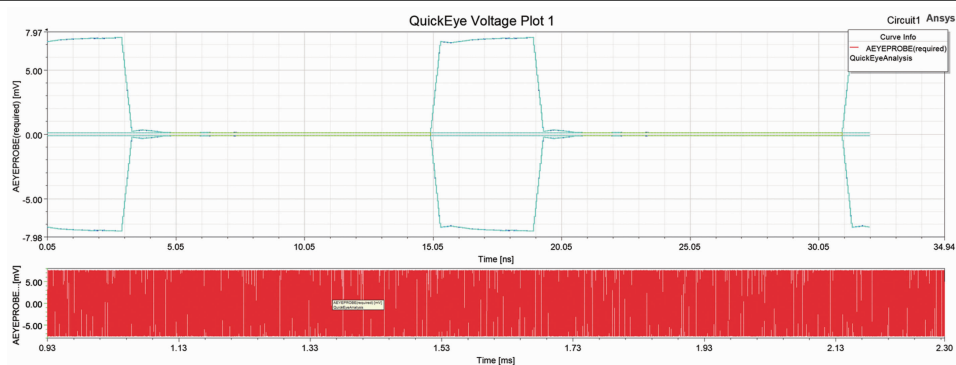
图 9 不同孔径大小以及不同焊盘大小的过孔的 TDR 曲线

对于该信号传输而言, 以上四种过孔的回波损耗较小。其中, 前两种过孔(见图 11(a)与图 11(b))传输线上的回波损耗越大, 意味着更少的信号被反射回源端, 减小了信号传输中的能量损失和系统性能降幅。

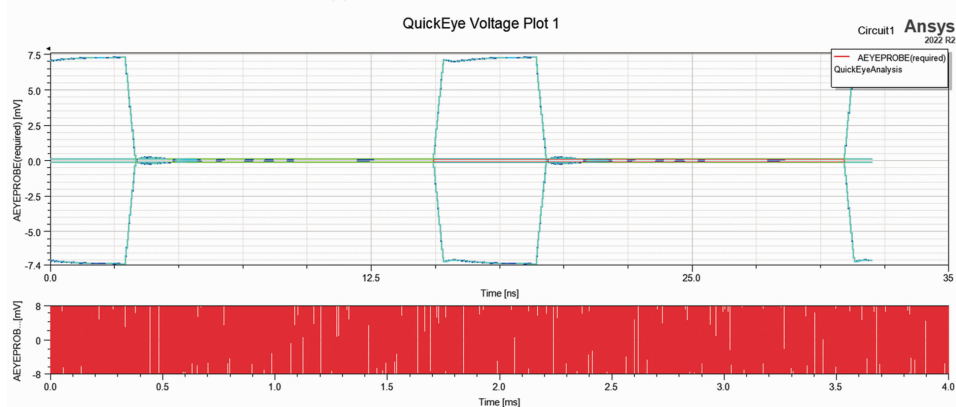
较大的过孔可能引入额外的电磁路径, 增加电磁辐射的可能性, 进而影响周围的信号线和器件。这种干扰可能导致信号失真、串扰, 甚至影响整个系统的稳定性。

从信号完整性(眼图)来看, 较大的过孔在通过高频信号时越不稳定, 且更容易带来因阻抗不匹配导致的信号反射、信号衰减、电磁干扰等问题。因此, 在高频和高速应用中, 确保过孔的阻抗与周围环境匹配至关重要, 以保持信号完整性。

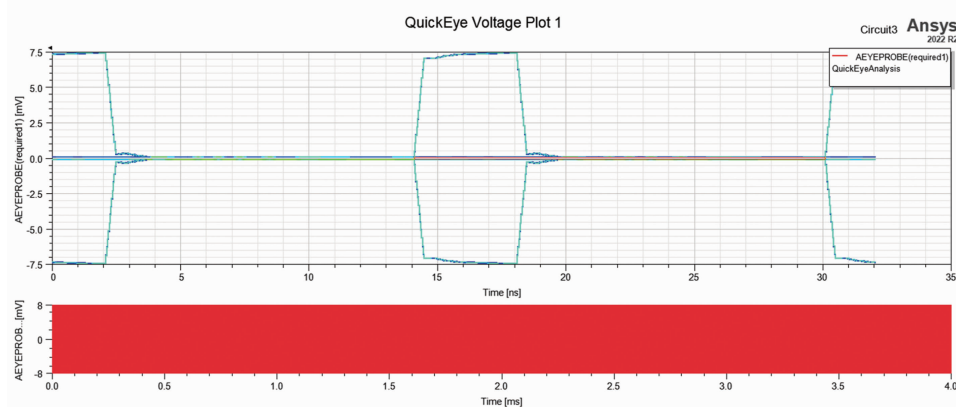
精心选择过孔的大小并根据具体应用场景和信号特性进行合理的优化, 对于确保 PCB 的 EMC 和整体性能至关重要。



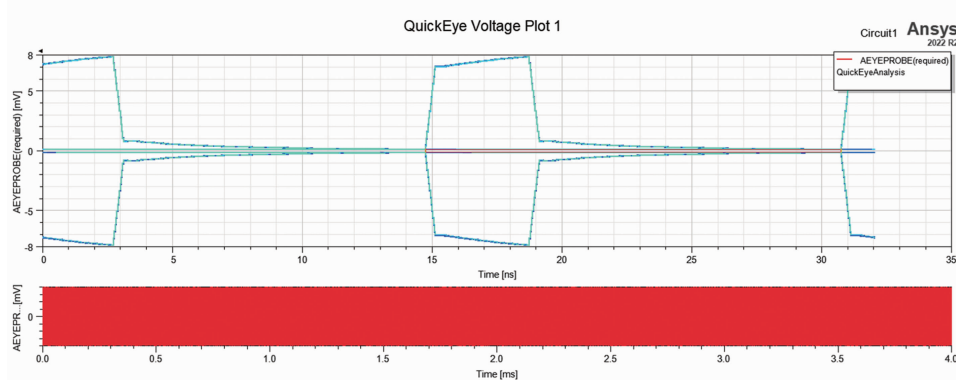
(a) 孔径为0.2 mm、焊盘直径为0.5 mm



(b) 孔径为0.2 mm、焊盘直径为0.4 mm

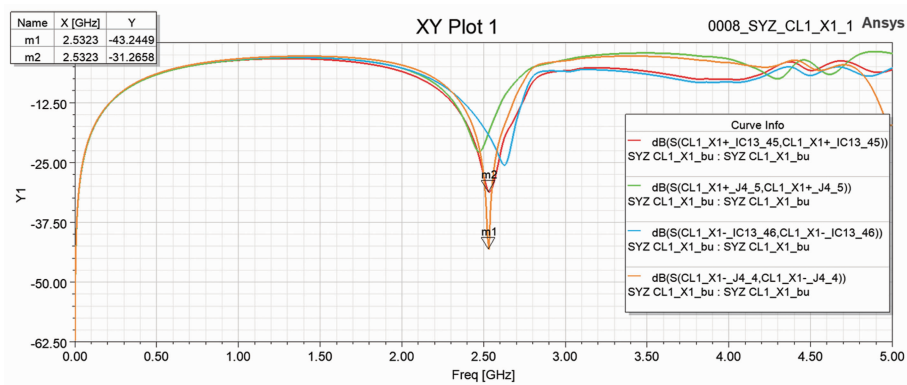


(c) 孔径为0.2 mm、焊盘直径为0.6 mm

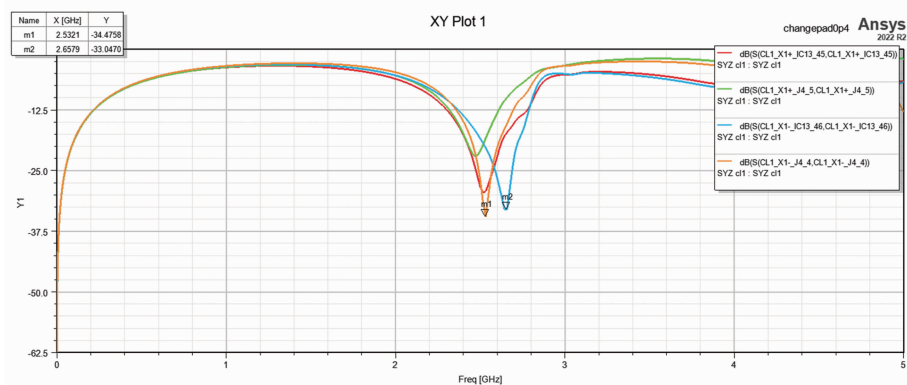


(d) 孔径为0.25 mm、焊盘直径为0.55 mm

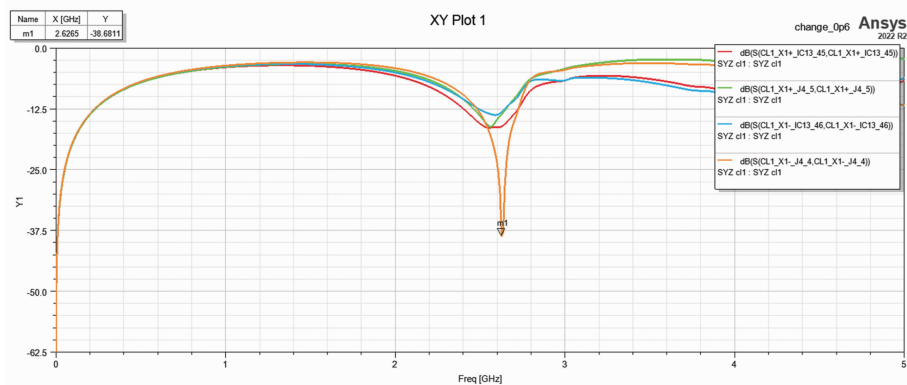
图 10 相同信号经过不同孔径大小以及不同焊盘大小的过孔的眼图



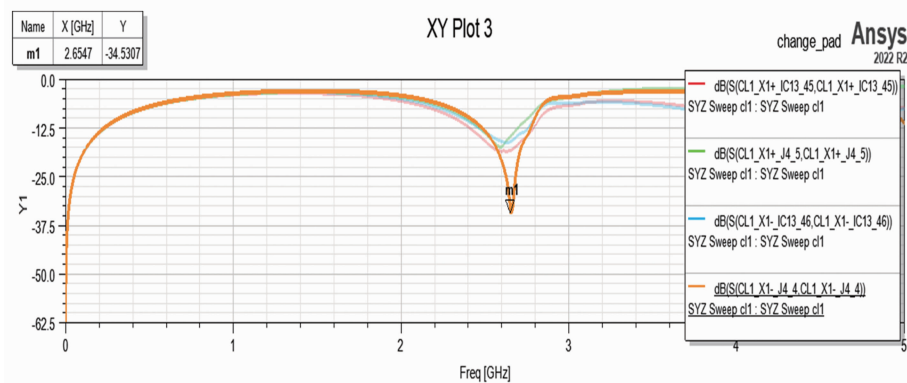
(a) 孔径为0.2 mm、焊盘直径为0.5 mm



(b) 孔径为0.2 mm、焊盘直径为0.4 mm



(c) 孔径为0.2 mm、焊盘直径为0.6 mm



(d) 孔径为0.25 mm、焊盘直径为0.55 mm

图 11 不同过孔的回波损耗

3 结束语

红外成像系统可以对红外探测器获得的信号进行放大、滤波和数字化处理,以生成可视化的图像或提供有用的信息。本文针对红外成像电路的特点,对提供关键信息的小信号走线采取一些保护措施,尽可能减小信号受到外界磁场干扰的可能性;通过模态分析和频域分析,研究确定了潜在的谐振频率,并通过添加去耦电容的方式来消除谐振频点,削弱了潜在的电磁问题;针对高频的图像输出信号,根据仿真结果选择了相对适合该工作频点的过孔以缓解信号的反射、衰减、EMI 等问题,旨在提高图像的质量以及系统的可靠性。

仿真结果表明,这些优化措施在提高 PCB 性能和稳定性方面取得了显著的效果,在理论层面提供了有益的指导,同时也为 PCB 设计和优化提供了实用的方法和策略。虽然仿真工具的应用能够在很大程度上帮助设计者提前发现和解决 EMC 问题,但仍然需要实际测试来

验证仿真结果。后续也将综合使用仿真和实测的手段来确保 PCB 满足 EMC 要求。

参考文献

- [1] 陈放, 田建宇, 孙兆牛, 等. 基于信号完整性与电源完整性的 PCB 电磁兼容协同仿真方法研究 [J]. 航天控制, 2017, 35(4): 90-94.
- [2] 鲁国斌. 基于信号完整性分析的高速数字 PCB 板设计方法 [J]. 航空电子技术, 2008, 33(2): 39-42.
- [3] 李科, 李正雄, 孙振宁, 等. 探究提升电路板电磁兼容性的方法 [C]. 北京: 第七届中国指挥控制大会, 2019.
- [4] 孟晶, 俞能杰. 高速 PCB 板谐振仿真与分析 [J]. 现代电子技术, 2014, 37(10): 144-146.
- [5] 李小平. 高速 PCB 的信号完整性、电源完整性和 EMC 研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [6] 麻勤勤, 石和荣, 孟宏峰. 基于 SIwave 和 Designer 的差分过孔仿真分析 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 40-44.