

团 体 标 准

T

T/TMAC ×××—2026

PCB 信号完整性 (SI) 仿真与测试方法

PCB signal integrity (SI) simulation and testing methods

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

已授权的专利证明材料为专利证书复印件或扉页，已公开但尚未授权的专利申请证明材料为专利公开通知书复印件或扉页，未公开的专利申请的证明材料为专利申请号和申请日期。

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中国技术市场协会 发布

中国技术市场协会（TMAC）是科技领域内国家一级社团，以宣传和促进科技创新，推动科技成果转移转化，规范交易行为，维护技术市场运行秩序为使命。为满足市场需要，做大做强科技服务业，依据《中华人民共和国标准化法》《团体标准管理规定》，中国技术市场协会有序开展标准化工作。本团体成员和相关领域组织及个人，均可提出修订 TMAC 标准的建议并参与有关工作。TMAC 标准按《中国技术市场协会团体标准管理办法》《中国技术市场协会团体标准工作程序》制定和管理。TMAC 标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议多数专家的同意，方可予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料反馈至中国技术市场协会，以便修订时参考。

本作品著作权归中国技术市场协会所有。除了用于国家法律或事先得到中国技术市场协会正式授权或许可外，不许以任何形式复制本文件。第三方机构依据本文件开展认证、评价业务，须向中国技术市场协会提出申请并取得授权。

中国技术市场协会地址：北京市海淀区复兴路甲 23 号城乡华懋大厦 12 层 1217。

邮政编码：100036 电话：010-68270447 传真：010-68270453

网址：www.ctm.org.cn 电子信箱：136162004@qq.com

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 仿真与测试原理	1
4.1 仿真原理	2
4.2 频域测试原理	2
4.3 时域测试原理	2
5 环境要求	2
6 软件、设备与测试耗材要求	2
6.1 软件要求	2
6.2 设备要求	2
6.3 校准件	2
6.4 测试电缆	2
7 完整性仿真流程	3
7.1 仿真流程	3
7.2 仿真目标与判定准则	4
7.3 仿真优化	4
8 样品	4
8.1 样品制备	4
8.2 样品保存	4
9 测试方法	4
9.1 频域测试	4
9.2 时域测试	4
9.3 仿真验证	4
10 测试数据处理	5
10.1 数据记录	5
10.2 重复性与再现性	5
10.3 异常处理	5
11 质量保证和控制	5
11.1 设备校准	5
11.2 环境监控	5
11.3 样品检查	5
11.4 人员资质	5
12 测试报告	5

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国技术市场协会提出并归口。

本文件起草单位：胜宏科技(惠州)股份有限公司、重庆方正高密电子有限公司、北京中研博采技术服务有限公司、北京六只猫创意科技有限公司、北京彬诚科技有限公司等单位。

本文件主要起草人：赵启祥、李金鸿、夏国伟、孙军、乐志斌、夏卫彬、杨笛等。

PCB 信号完整性 (SI) 仿真与测试方法

1 范围

本文件规定了PCB信号完整性 (SI) 仿真与测试方法, 包括仿真与测试原理、环境要求、软件、设备与测试耗材要求、完整性仿真流程、测试方法、测试数据处理、质量保证和控制及测试报告等内容。本文件适用于刚性、刚性—挠性结合、HDI及高速背板等单、多层PCB的信号完整性验证。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中, 注日期的引用文件, 仅该日期对应的版本适用于本文件; 不注日期的引用文件, 其最新版本 (包括所有的修改单) 适用于本文件。

GB/T 4677 印制板测试方法

GB/T 17626.5 电磁兼容 测试和测量技术 浪涌 (冲击) 抗扰度测试

JJG 1049 弱磁场交变磁强计检定规程

JJF 1495 矢量网络分析仪校准规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

信号完整性 signal integrity

信号在传输过程中保持其幅度、时序和形状的能力。

3.2

S参数 S-parameters

表征高频网络端口间信号传输与反射特性的复数矩阵参数, 包括插入损耗 (S21)、回波损耗 (S11)、串扰 (S31/S41) 等。

3.3

插入损耗 insertion loss

信号通过通道后的功率衰减, 以dB表示。

3.4

回波损耗 return loss

反射功率与入射功率之比, 以dB表示。

3.5

TDR 阻抗 TDR impedance

用时域反射计测量的特性阻抗。

3.6

眼图 eye pattern

将比特流重叠显示形成的图形, 用于评估信号质量。

4 仿真与测试原理

4.1 仿真原理

采用全波电磁场求解器（FDTD/FEM）或传输线模型，提取S参数并生成眼图。

4.2 频域测试原理

利用矢量网络分析仪（VNA）在50 MHz~110 GHz测量S参数，计算插入损耗、回波损耗、串扰。

4.3 时域测试原理

利用TDR或实时示波器获取反射系数与阻抗分布，以及眼图分析。

5 环境要求

测试环境要求应符合以下规定：

- a) 温度：(23±5) °C；
- b) 相对湿度：45%~55%；
- c) 气压：86 kPa~106 kPa；
- d) 电磁环境：背景噪声不大于-90 dBm。

6 软件、设备与测试耗材要求

6.1 软件要求

软件条件应符合以下规定：

- a) 仿真软件：HFSS、ADS、SIwave或等效工具；
- b) 校准模型：TRL、SOLT、LRM；
- c) 网格剖分：不大于 $\frac{\lambda}{20}$ 最小单元尺寸。

6.2 设备要求

6.2.1 主要设备

主要设备应符合表1规定。

表1 主要设备要求

设备名称	关键指标	校准周期	标准
矢量网络分析仪	0.05 GHz~110 GHz，动态范围不小于125 dB	12个月	JJF 1495
TDR/采样示波器	上升时间不大于9 ps，带宽不小于70 GHz	12个月	GB/T 17626.5
高速实时示波器	带宽 不小于70 GHz，采样率不小于200 GSa/s	12个月	JJG 1049
探针台	最小pitch 40 μm，漏电流不大于10 pA	6个月	GB/T 4677

6.2.2 辅助设备

低噪声电源、温控夹具（25 °C±0.5 °C）、屏蔽箱（屏蔽效能不小于80 dB）。

6.3 校准件

校准件应符合表2规定。

表2 校准件

名称	规格	频率范围	精度
开路标准	3.5 mm(f)	DC~26.5 GHz	±0.05 dB
短路标准	3.5 mm(f)	DC~26.5 GHz	±0.05 dB
负载50 Ω	3.5 mm(f)	DC~26.5 GHz	±0.03 dB

6.4 测试电缆

低损耗稳幅电缆，插入损耗不大于0.1 dB/500 mm@20 GHz，相位稳定度不大于±2°。

7 完整性仿真流程

7.1 仿真流程

仿真流程由以下五个连续阶段组成，仿真流程图见图1，每个阶段均应保留版本控制记录，并存档不少于3年。

- a) 需求捕获：根据设计规范列出关键网络包括不小于1 Gbps或不小于5 GHz的时钟、数据、控制线；
- b) 建模：在HFSS/SIwave中建立包含叠层、过孔、走线、连接器的全波3D模型；网格最大边长不大于 $\frac{\lambda}{20}$ ；
- c) 模型验证：以TRL校准的VNA测量S参数为基准，仿真—测试偏差 $|\Delta S_{21}| \leq 0.5$ dB且 $|\Delta S_{11}| \leq 3$ dB视为通过；
- d) 性能预测：生成眼图、BER浴盆曲线、TDR阻抗曲线；记录插入损耗、回波损耗、NEXT/FEXT、Z₀、眼高和眼宽、抖动（TJ/RJ/DJ）；
- e) 闭环优化：若任一指标不满足设计门限，则返回b)修改叠层、走线、端接或材料，直至所有指标满足。

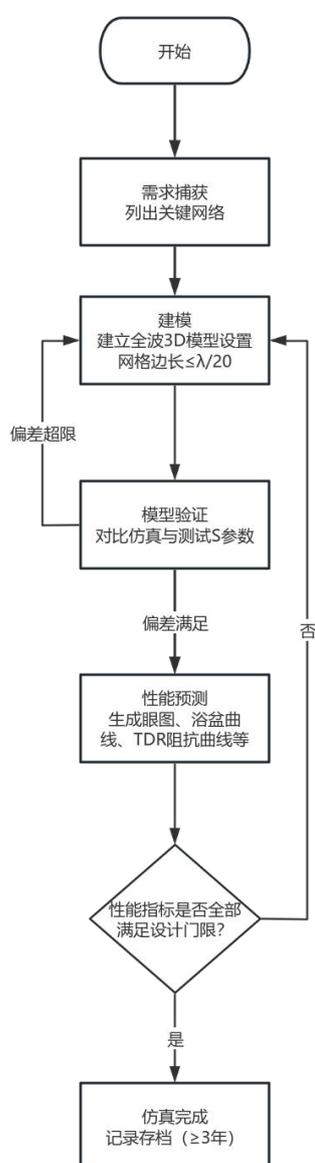


图 1 仿真流程图

7.2 仿真目标与判定准则

仿真目标与判定准则应符合表3规定。

表3 仿真目标与判定准则

序号	仿真目标	设计门限
1	插入损耗 (S21)	≤ -3 dB @Nyquist 频率
2	回波损耗 (S11)	≤ -10 dB @Nyquist 频率
3	串扰损耗 (NEXT/FEXT)	≤ -40 dB @Nyquist 频率
4	TDR阻抗	$50 \Omega \pm 5 \Omega$
5	眼图眼高	≥ 200 mV @25 Gb/s
6	眼图眼宽	≥ 0.4 UI @25 Gb/s
7	总抖动TJ	≤ 0.15 UI @BER=1E-12
8	时序验证	信号建立/保持时间裕量 ≥ 0.2 UI, 时钟一数据抖动 ≤ 0.1 UI

7.3 仿真优化

完成PCB信号完整性 (SI) 仿真后应进行以下优化：

- 当TDR阻抗偏差 $>5 \Omega$ 时，调整走线宽度或介电常数；
- 眼图眼宽 <0.4 UI时，优化端接电阻或减小串扰；
- 每次优化后重新执行模型验证；
- 优化过程记录纳入版本控制，存档 ≥ 3 年。

8 样品

8.1 样品制备

样品制备应符合以下规定：

- 尺寸：100 mm \times 100 mm或 ϕ 300 mm圆片；
- 结构：微带线、带状线、差分线、过孔链、背钻结构；
- 表面处理：沉金或OSP，粗糙度Ra不大于 $0.5 \mu\text{m}$ 。

8.2 样品保存

真空封装，温度 $15 \text{ }^\circ\text{C} \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，湿度不大于30%RH。

9 测试方法

9.1 频域测试

9.1.1 插入损耗与回波损耗

使用VNA在50 MHz \sim 110 GHz测量S21、S11；校准后扫描1601点，功率0 dBm。

9.1.2 近端串扰 (NEXT) 和远端串扰 (FEXT)

按IPC-TM-650设置6线耦合模型，频率步进10 MHz。

9.2 时域测试

9.2.1 TDR 阻抗

上升时间35 ps，记录阻抗Z0，步距 $10 \mu\text{m}$ ，扫描长度100 mm。

9.2.2 眼图

PRBS 2³¹-1，数据率25 Gb/s，幅度500 mVpp，采样深度1 MUI。

9.3 仿真验证

建立HFSS全波模型，材料参数：Dk@10 GHz=3.45±0.05，Df@10 GHz=0.005±0.001；网格不大于 $\frac{\lambda}{20}$ ；收敛误差不大于1%。

10 测试数据处理

10.1 数据记录

测试原始数据保存不小于3年，文件名含日期、批次、操作员。

10.2 重复性与再现性

重复性和再现性应符合表4规定。

表4 重复性和再现性

参数	重复性RSD	再现性RSD
插入损耗@10 GHz	不大于1%	不大于2%
回波损耗@10 GHz	不大于1.5%	不大于3%
TDR阻抗	不大于0.5 Ω	不大于1 Ω

10.3 异常处理

若 $|Z_0 - \text{设计值}| > 5 \Omega$ 或插入损耗大于规范值10%，需重新制样并复核。

11 质量保证和控制

11.1 设备校准

按JJG 1049周期校准，证书存档不小于5年。

11.2 环境监控

每班次记录温湿度，超差立即停机。

11.3 样品检查

目检无划痕、无氧化，探针痕迹不大于2处。

11.4 人员资质

测试员须通过IPC-CID+认证，关键步骤双人复核。

12 测试报告

报告包括但不限于以下内容：

- a) 样品信息包括编号、尺寸、层数、材料等；
- b) 测试条件包括设备型号、校准日期、环境等；
- c) 结果汇总表包括插入损耗、回波损耗、阻抗、眼图参数等；
- d) 原始数据文件链接包括二维码或云盘等；
- e) 测试人员、审核人签字及日期。