



高速数字设计和信号完整性分析

——电源分布系统设计

上海傲普科技有限公司



电源分布系统设计

- 基本概念
- 设计目标
- 一般设计规则
- 多层板叠层结构
- 电流回路
- 去耦电容及其应用
- 噪声抑制

- 电源分布系统
Power Distribution System (PDS)
- 当电源、地层之间存在足够的去耦电容后，其交流阻抗极小，交流信号可以在任何一层上传输。换言之，对于交流信号而言，电源、地层是没有区别的，可以统称为平面 (Plane)
- 平面 (Plane) 为电流回路提供最低阻抗回路
- PDS阻抗

$$Z_{PDS} = \frac{\text{电源电压} \times \text{允许电压波动的比率 (百分数)} \div 100}{\text{需要的电流}}$$

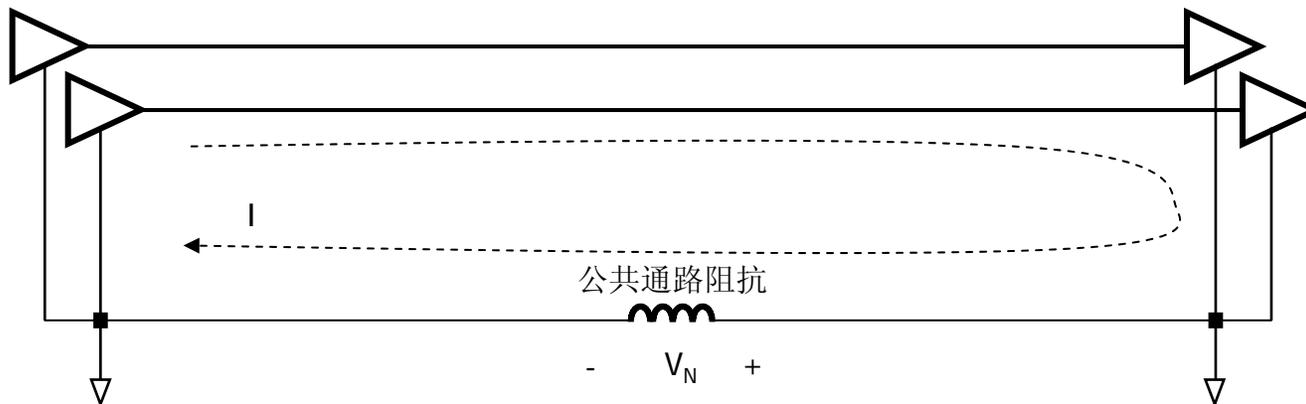


设计目标

- 为数字信号提供稳定的电压参考
- 为逻辑电路正常工作提供电源

为数字信号提供稳定的电压参考

- 为逻辑电路提供低阻抗的接地连接
- 为逻辑电路提供低阻抗的电源连接
- 为电源和地提供低交流阻抗的通路





为数字电路正常工作提供电源

- 公共通路阻抗将产生电源和地电位差
 - $X_{PSW} = ESR + 2\pi f \times ESL$
 - ESR —— 电源分布系统寄生电阻。低频或直流情况下，是造成电源电位差的主要原因。
 - ESL —— 电源分布系统寄生电感。高频情况下，交变电流将在寄生电感上产生电源电位差，其幅度远大于寄生电阻的影响。

电源分布系统寄生电感

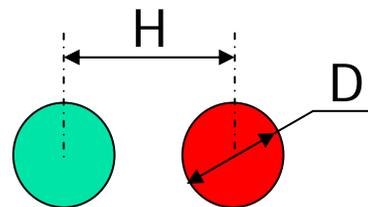
■ 两条平行的电源和地圆导线

$$L_{PDS} = 10.16 \times X \times \ln\left(\frac{2H}{D}\right) \text{ nH}$$

X — 电源分布线长度, in

H — 电源分布线平均间距, in

D — 电源分布线直径, in



■ 多层平行堆叠的扁平带状的电源和地线

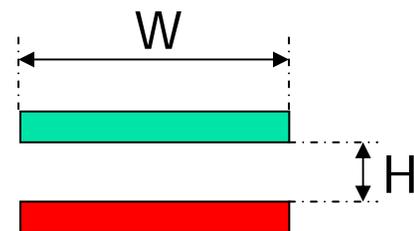
$$L_{PDS} = 31.9 \times \frac{X \times H}{W(N-1)} \text{ nH}$$

X — 电源分布线长度, in

H — 电源分布线平均间距, in

W — 电源分布线宽度, in

N — 电源和地层数



N=2



一般设计规则 (1)

- PDS必须为电路正常工作提供稳定的、无噪声的电压和电流
- 为数字信号提供稳定的电压参考
- 对于每一个电路来说，PDS应当被视为独立的、相互隔离的，以保证噪声不能通过PDS耦合到其他电路
- 电源、地平面（线）之间应具有尽可能小的交流阻抗
- PDS必须为信号提供无干扰的回流通路
- 电源、地平面应同时具备空间电场的屏蔽作用

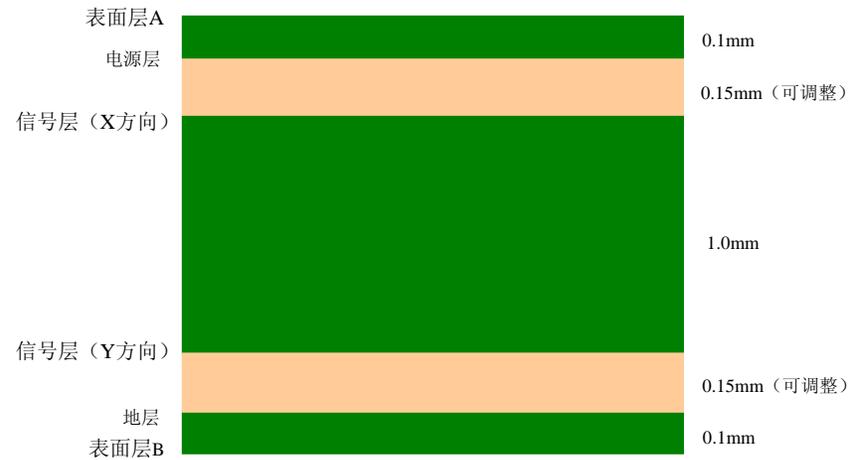
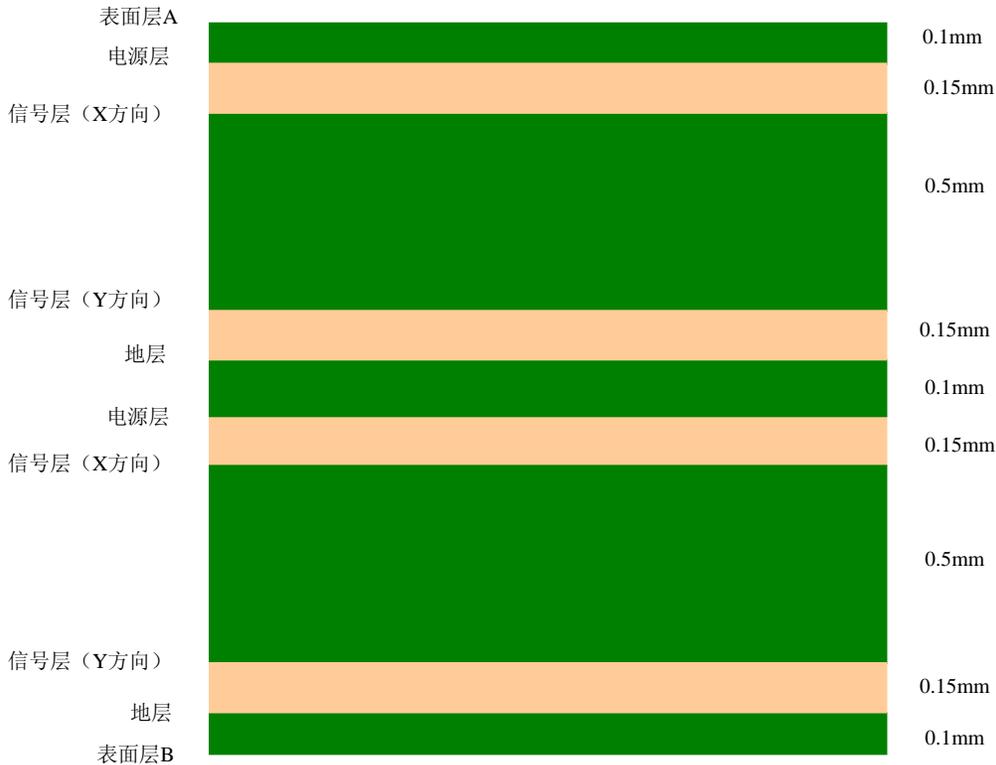
一般设计规则（2）

- 尽可能采用平面设计，或保持电源和地线尽可能短和宽，避免“梳状”地线
- “背靠背”的电源和地层设计，具有最小的PDS阻抗，并具备高频去耦作用，能有效抑制高频噪声
- 配置足够的、均匀分布的去耦电容
- 在数模混合设计中，应为数字电路和模拟电路分别提供独立的PDS
- 大量的不同逻辑电平、不同噪声容限的电路（如TTL、ECL等）在混合设计中，应为它们分别提供独立的PDS
- 不同的电源、地层应相对隔离，不直接叠压

多层板的叠层结构

- 叠层结构的设计主要考虑以下因素
 - 稳定、低噪声、低交流阻抗的PDS
 - 传输线结构要求
 - 传输线特性阻抗要求
 - 串扰噪声抑制
 - 空间电磁干扰的吸收和屏蔽
 - 结构对称，防止变形
- 在高速数字设计中的一般规则是
 - 电源层数 + 地层数 = 信号层数
 - 电源层和地层尽可能成对设计，并至少有一对是“背靠背”设计
 - 采用带状线结构，关键信号传输应采用对称带状线

多层板的叠层实例



基材



填充材料

■ 基本概念

所有电流必须有流回源的回路。该回路的产生会自动寻找最小阻抗的路径。通常在具有电源/地层平面的PCB结构中，会直接在信号线下方的平面上（电源或地）。该回流信号（电流）与原信号（电流）幅度相同、方向相反。

$$i(D) = \frac{I_0}{\pi \times H} \times \frac{1}{1 + (D / H)^2}$$

I_0 — 信号总电流，A

H — 信号线到参考平面的距离，m

D — 观测点到信号线中心的垂直距离，m

$i(D)$ — 观测点的回流电流密度，A/in

■ 环路面积

信号和回流信号通路构成了一个闭合回路。随着环路面积的增大，将产生更多的差模辐射噪声，且更易于受外界干扰的影响。

$$E = \frac{2.6 \times (A \times I_L \times f^2)}{R} \quad \mu \text{ V/m}$$

A — 环路面积，cm²

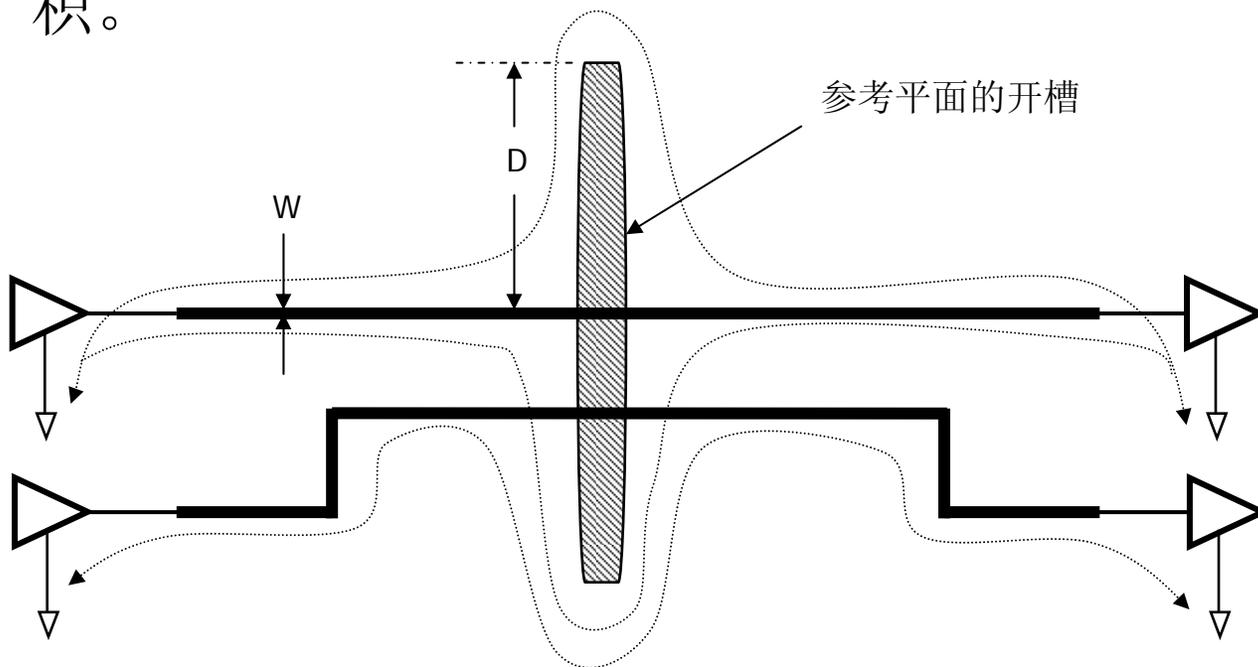
I_L — 环路电流，A

f — 频率，MHz

R — 观测点到电场中心的距离，m

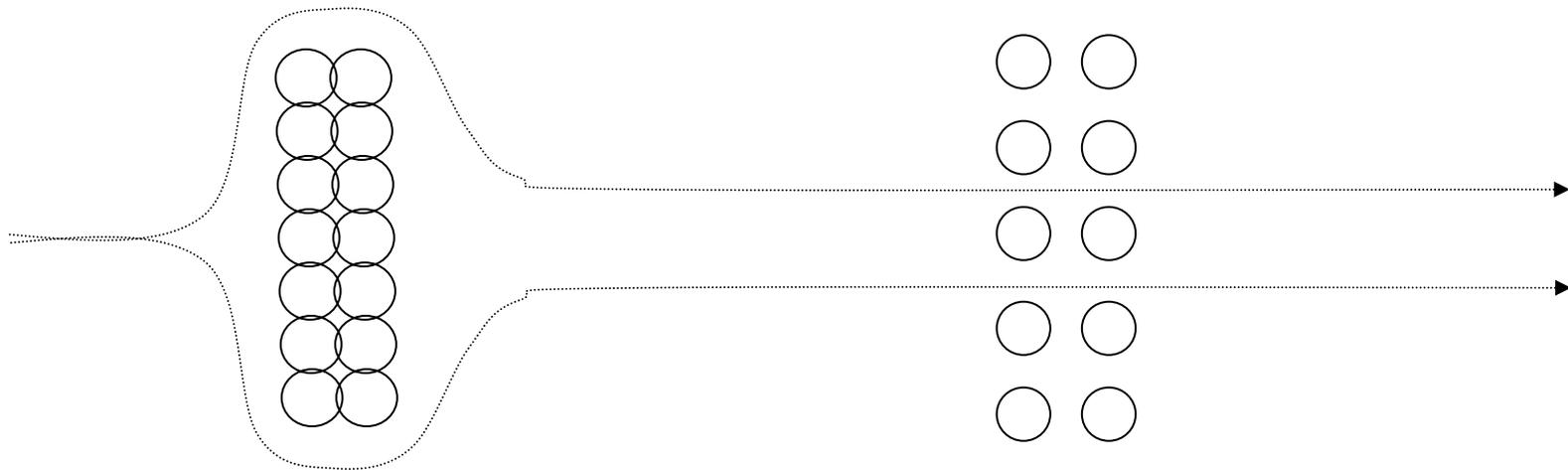
■ 参考平面的开槽

不适当的参考平面的开槽，将增加信号的环路面积。



■ 连接器的隔离盘

连接器在参考平面上不适当的隔离盘，将增加信号的环路面积。



电流回路 (5)

- 信号环路面积增加，将产生额外的感抗，减慢信号边沿速率，并在临近信号线上产生互感串扰。
- 图3中：

$$L = 5 D \ln\left(\frac{D}{W}\right) \text{ nH}$$

$$T_{10-90 L/R} = 2.2 \times \frac{L}{2 \times Z_0}$$

$$T_r = \sqrt{(T_{10-90 L/R})^2 + (T_{10-90})^2} \quad (\text{长线})$$

$$T_r = 3.4 \times \sqrt{L \times C} \quad (\text{短线})$$

$$V_{\text{crosstalk}} = \frac{\Delta V \times L}{T_r \times Z_0} \quad (\text{长线})$$

$$V_{\text{crosstalk}} = \frac{1.52 \times \Delta V \times C \times L}{(T_r)^2} \quad (\text{短线})$$



去耦电容及其应用

- 去耦电容
- 低频大容量电容（bulk）
- 高频去耦电容
- 多层陶瓷片式电容的材料选择
- 表面贴装电容的布局 and 布线
- 多层PCB中的平面电容
- 埋入式电容



去耦电容

- 去耦作用

消除高频开关电路产生的RF能量，为电路提供一个低阻抗本地直流源

- 完成去耦作用的前提，是保证在电源分布系统具有较低的交流阻抗



低频大容量电容（bulk）

- 在所有的信号管脚开关同时处于最大的容性负载条件时，提供稳定的直流电压、电流
- 通常选用大容量钽电容，电压额定值一般为电路额定工作电压的5倍
- 放置位置
 - 时钟电路附近
 - 输入/输出连接处
 - 大功耗电路附近
 - 远离电源馈入点的位置

低频大容量电容的选择步骤

- 计算电路的最大交变电流 (ΔI)
- 给出电路所允许的最大电源电位差噪声 (ΔV)
- 计算电路所允许的最大 $X_{MAX} = \Delta V / \Delta I$
- 给出电源、地分布线的寄生电感 L_{PSW}
- 计算电源、地分布线的最高响应频率 F_{PSW}

$$F_{PSW} = \frac{X_{MAX}}{2 \times \pi \times L_{PSW}}$$

- 计算去耦所需要的最小电容值 C_{bypass}

$$C_{bypass} = \frac{1}{2 \times \pi \times F_{PSW} \times X_{MAX}}$$

- 根据去耦电容的引脚电感 L_C ，计算其最高响应频率 F_{bypass}

$$F_{bypass} = \frac{X_{MAX}}{2 \times \pi \times L_C}$$

低频大容量电容的选择实例

- 某5V CMOS电路板有100个门，分别驱动10pF负载，边沿时间为5ns。电源分布线的电感为100nH

$$\Delta I = NC \frac{\Delta V}{\Delta t} = 100 \times 10 \text{ pF} \times \frac{5V}{5 \text{ ns}} = 1A$$

$$\Delta V = 0.100V$$

$$X_{MAX} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = 0.1\Omega$$

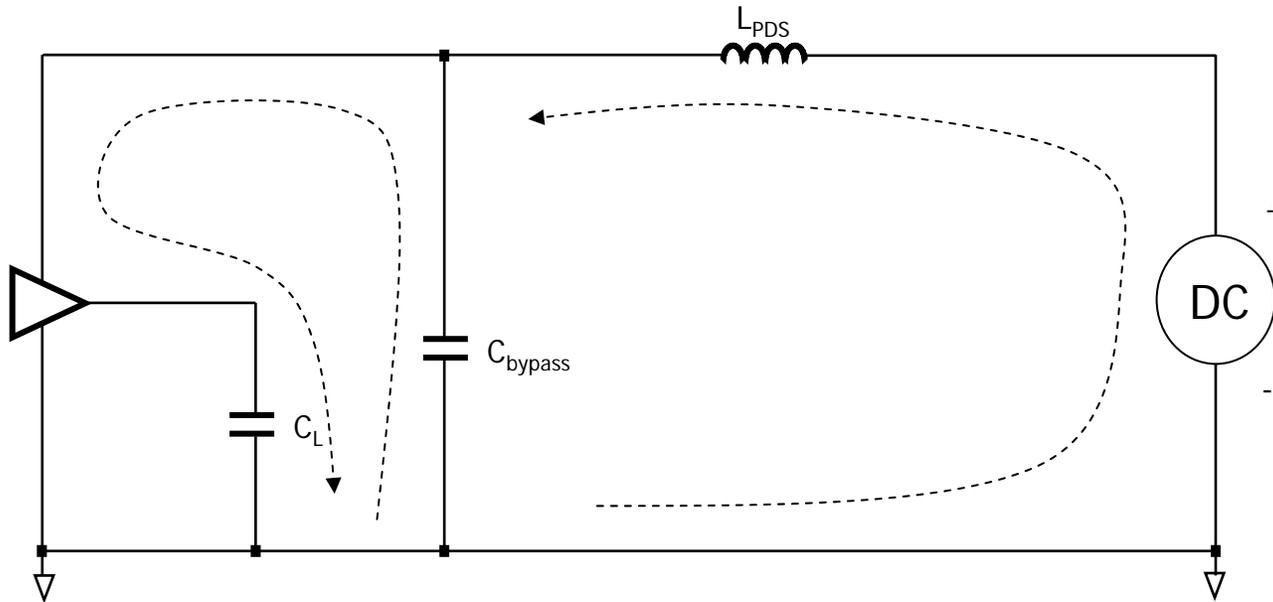
$$L_{PSW} = 100 \text{ nH}$$

$$F_{PSW} = \frac{X_{MAX}}{2\pi L_{PSW}} = 159 \text{ KHz}$$

$$C_{bypass} = \frac{1}{2\pi F_{PSW} X_{MAX}} = 10 \mu F$$

设电容引脚电感 $L_C = 5 \text{ nH}$ ，则 $F_{bypass} = \frac{X_{MAX}}{2\pi L_C} = 3.18 \text{ MHz}$

- 高频去耦电容为电路提供本地的低阻抗直流源



- 高频去耦电容的阻抗必须小于 X_{PSW}



选择高频去耦电容的一般原则

- 自谐振频率 $>$ 需抑制的时钟谐波频率
- 提供电路瞬态工作能量

高频去耦电容的选择步骤

- 计算系统在高频下正常工作所能允许的电感 L_{tot}

$$L_{tot} = \frac{X_{MAX}}{2 \times \pi \times F_{knee}} = \frac{X_{MAX} T_r}{\pi}$$

- 给出电容的引脚电感 L_C
- 计算并联电容的数目 N

$$N = \frac{L_C}{L_{tot}}$$

- 计算并联电容值 $C_{Parallel}$

$$C_{parallel} = \frac{1}{2 \times \pi \times F_{bypass} \times X_{MAX}}$$

- 计算每一个电容的值 $C_{element}$

$$C_{element} = \frac{C_{parallel}}{N}$$

高频去耦电容的选择实例

- 某5V CMOS电路板有100个门，分别驱动10pF负载，边沿时间为5ns。电源分布线的电感为100nH。设电容引脚电感 $L_C=5nH$ 。

$$T_r = 5ns \quad X_{MAX} = 0.1\Omega \quad F_{bypass} = 3.18MHz$$

$$L_{tot} = \frac{X_{MAX} \times T_r}{\pi} = 0.159nH$$

$$N = \frac{L_C}{L_{tot}} = 32$$

$$C_{parallel} = \frac{1}{2 \times \pi \times F_{bypass} \times X_{MAX}} = 0.5\mu F$$

$$C_{element} = \frac{C_{parallel}}{N} = 0.016\mu F$$

多层陶瓷片式电容的材料选择

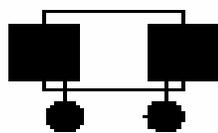
- 通常使用的材料有三种
 - NP0
 - X7R
 - Z5U
- X7R是去耦应用的最佳选择
 - 介电常数介于NP0和Z5U之间
 - 相对于Z5U，具有较好的温度和电压系数
 - 相对于NP0，具有较高的ESR和较差的温度和电压系数
 - 相同的封装下，电容值的范围比NP0宽

表面贴装电容的布局 and 布线

- 不同的布局，产生的寄生电感的数值相差很大



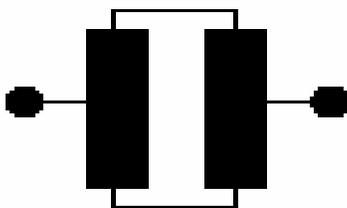
$L_{CAP}=1\text{ nH.}$
 $L_{TOTAL}=4.5\text{ nH.}$



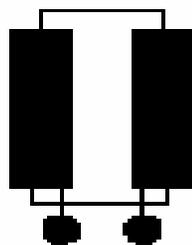
$L_{CAP}=1\text{ nH.}$
 $L_{TOTAL}=3\text{ nH.}$



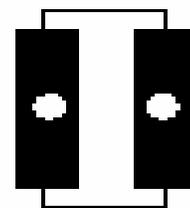
$L_{CAP}=1\text{ nH.}$
 $L_{TOTAL}=2\text{ nH.}$



$L_{CAP}=0.4\text{ nH.}$
 $L_{TOTAL}=3.9\text{ nH.}$



$L_{CAP}=0.4\text{ nH.}$
 $L_{TOTAL}=2.4\text{ nH.}$

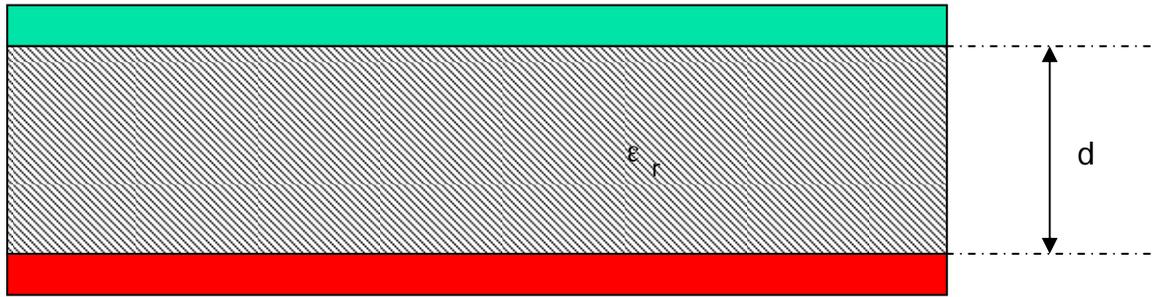


$L_{CAP}=0.4\text{ nH.}$
 $L_{TOTAL}=1.2\text{ nH.}$

- 应采用较大的过孔
- 电容焊盘到过孔的引线应尽可能短和宽

多层PCB中的平面电容

- 多层PCB中直接相邻（“背靠背”）的电源和地平面对构成了一个具有最小交流阻抗的平面电容



$$C_{plane} = \frac{0.225 \times \epsilon_r \times A}{d} \quad \text{pF}$$

A — 平面重叠面积, in²

d — 间隔距离, in

ϵ_r — 绝缘介质的介电常数

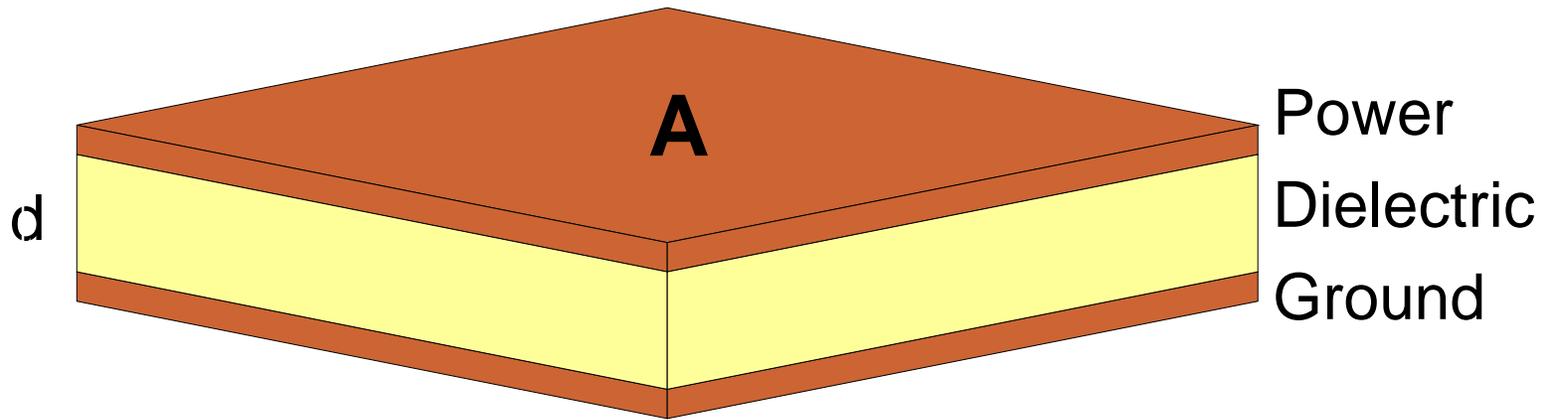
例如：当采用FR-4材料

($\epsilon_r=4.5$),

d=0.01 in时,

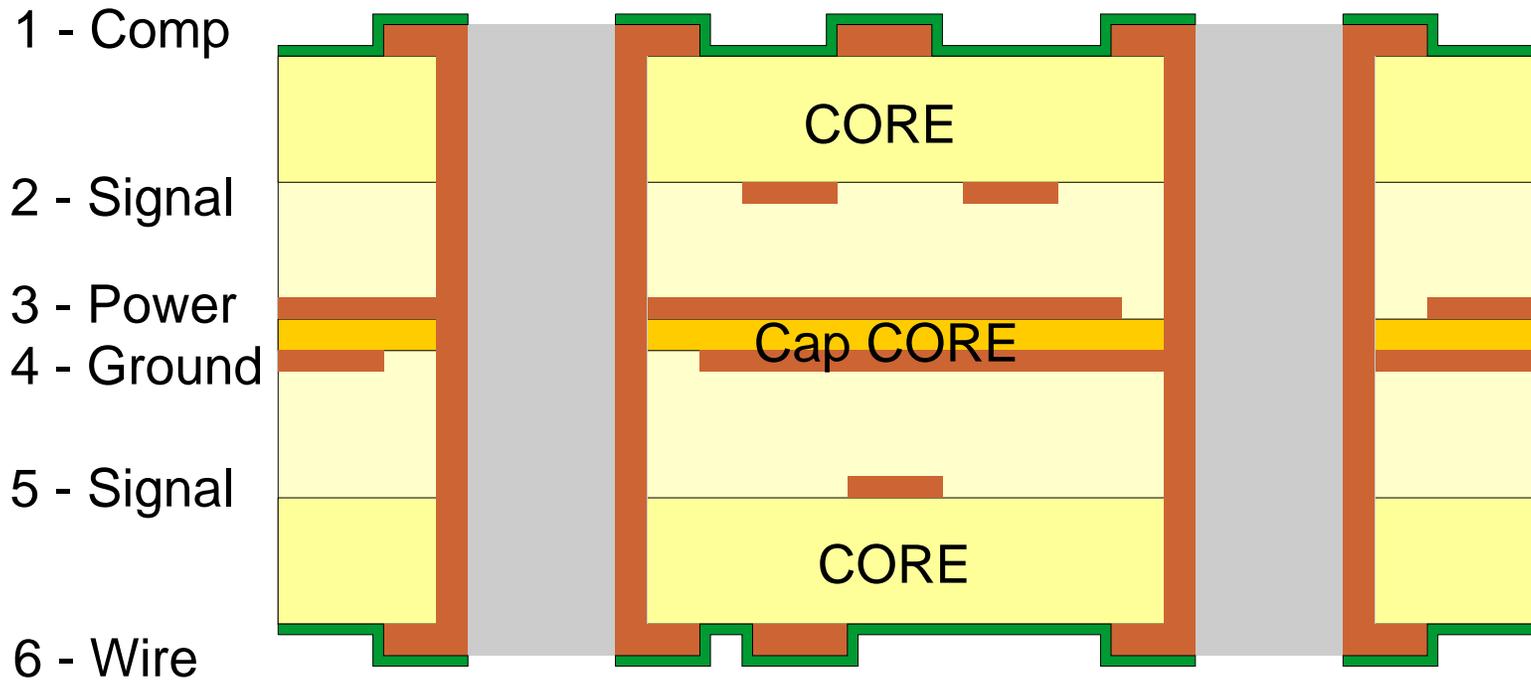
$C_{plane} = 100\text{pF}/\text{in}^2$

- 平面电容具有最好的高频特性



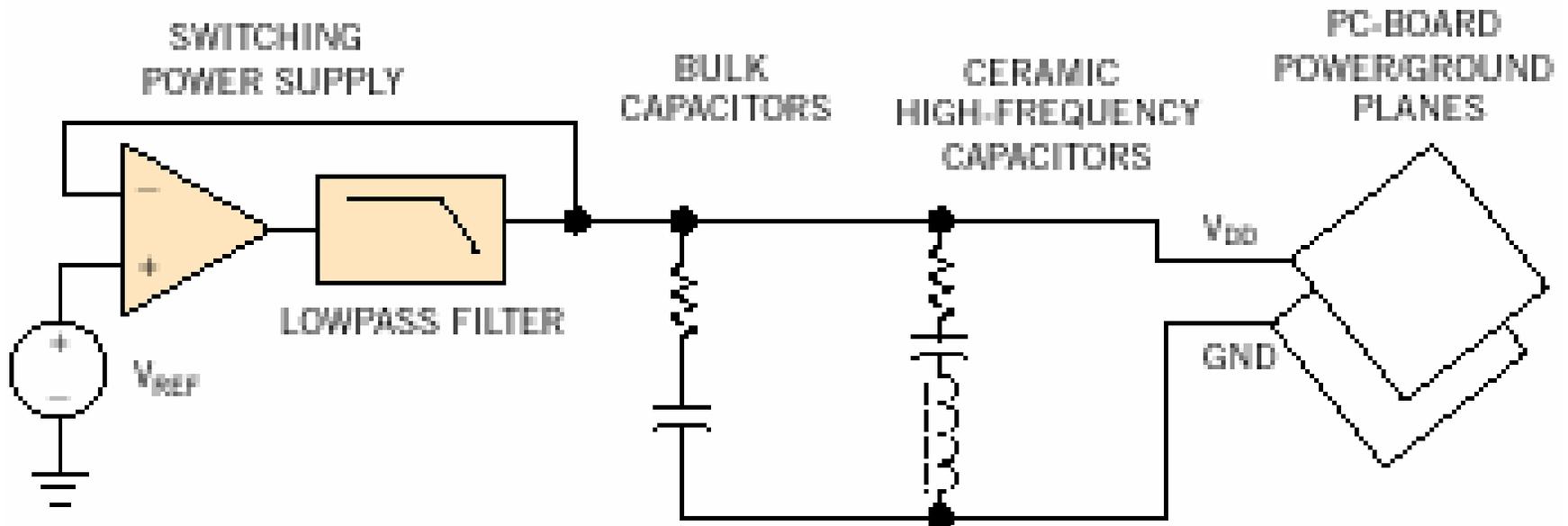
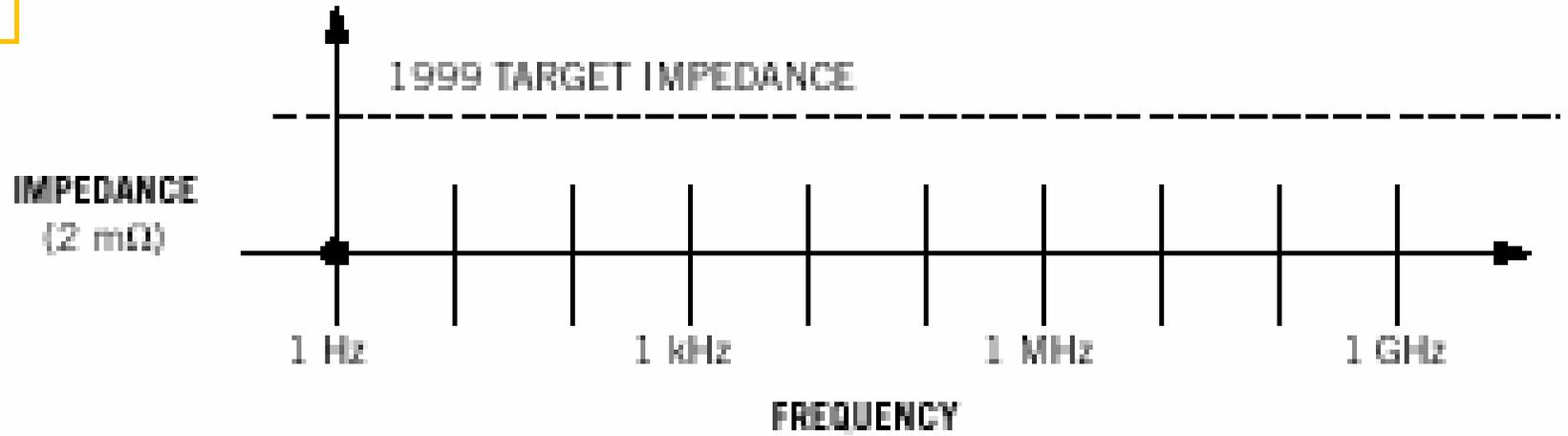
$$C = \frac{0.225 \times A \times \epsilon_r}{d}$$

若 $\epsilon_r = 90$ ，则 $C = 5\text{nf/in}^2$



6 Layer / 3 Core Construction

高速数字设计中典型的PDS



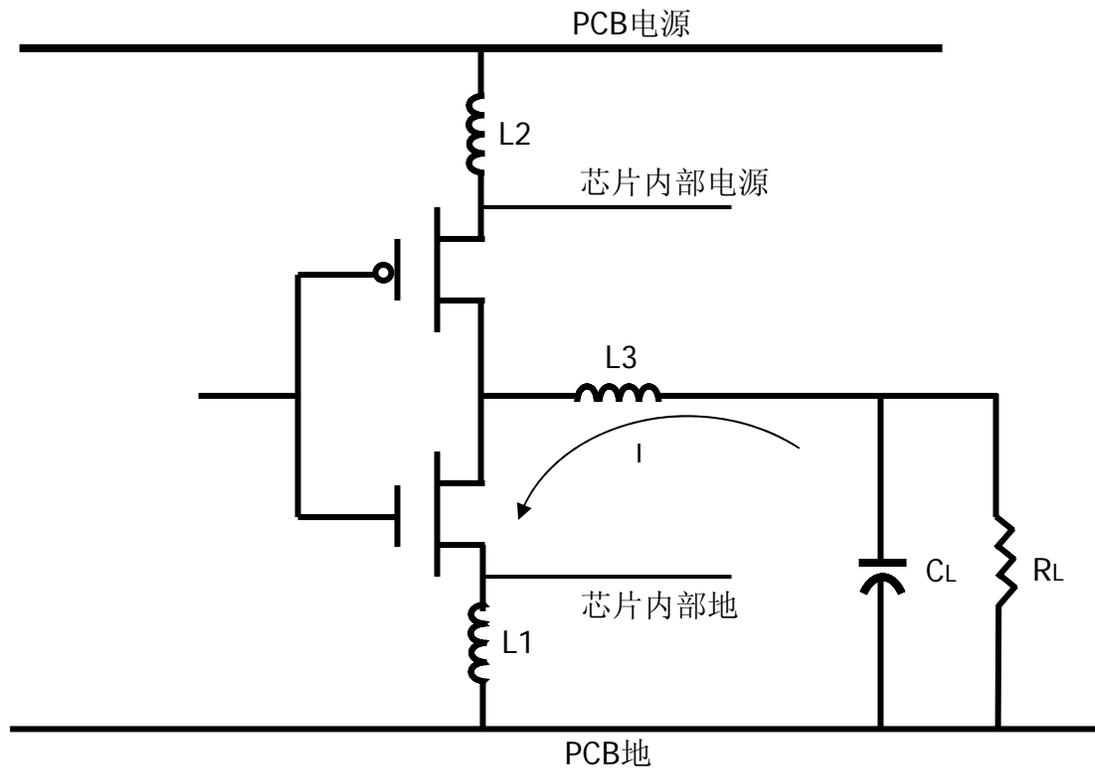


噪声抑制

- 系统电源变化
- 系统电源的电位差
- 系统逻辑地的电位差
- 地电平抖动

地电平抖动 (1)

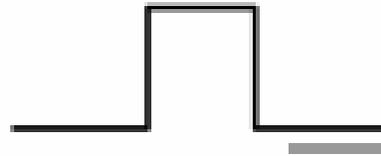
- 地电平抖动——Ground Bounce (GB)
- GB的起因



■ GB现象



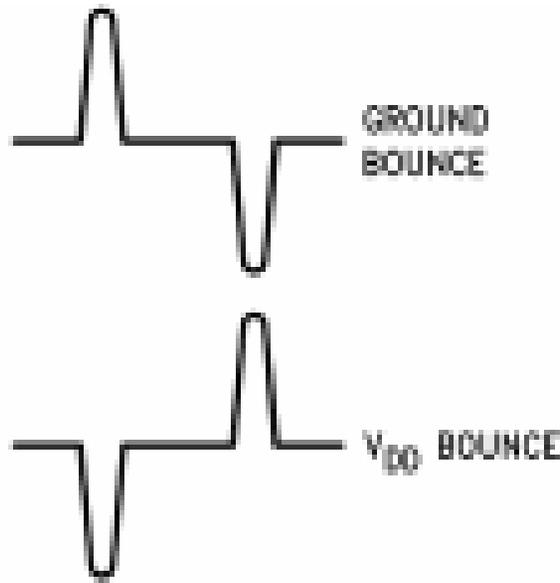
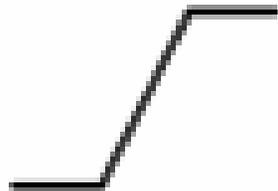
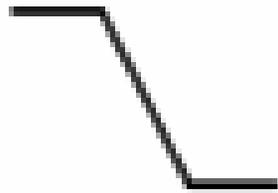
b. Output Voltage (V)



c. $I = -C_L \cdot (dV/dt)$



d. $V_{GB} = L \cdot (dI/dt)$



- 抑制GB的一般方法
 - 采用较小的封装形式
 - 采用适当的电源、地针数目和合理布局
 - 减小输出电压摆幅
 - 限制同时同相转换状态的输出单元数目
 - 增加传输线的特性阻抗
 - 减少容性负载
 - 在输出端串接阻尼电阻

谢 谢

射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

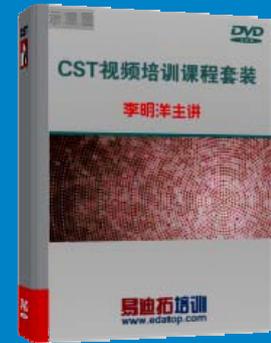
该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>