

VICOR

# 基本EMI预合规性及故障排除技术

刘广缘

高级应用工程师

# 概览

- 基本EMI测量与LISN
- 共模及差模噪声源
- 使用仿真模型分析EMI预合规性
- 布局注意事项
- 电场探针、信号分配器以及简单的电流探针
- 广泛的故障排除案例历史记录

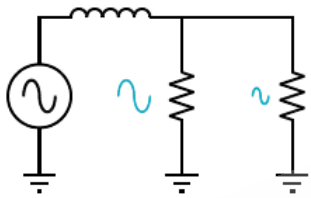
# 序言

如果您是从事电源电子产品工作的，迟早要了解EMI。最好早点了解，以便为以后解决难题做好准备。问题总是会让您措手不及，您也没有那么多时间来了解解决问题的方法。如果能在设计阶段早期时候就开始考虑相关问题，并针对其进行设计，您就能开发出一些工具，这些工具有一天将帮助您快速响应并解决问题，或者在问题成形前对其进行识别。希望您能喜欢这些内容……

# 什么是EMI?

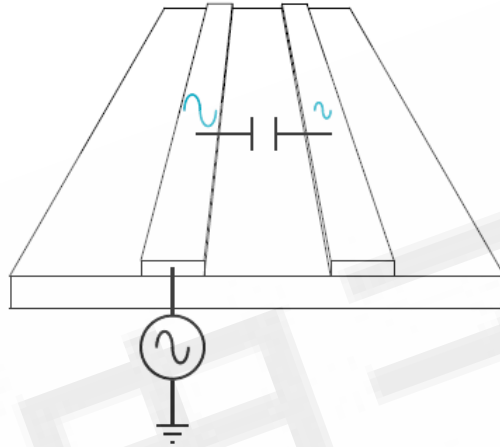
- EMI代表“电磁干扰”，一直用于描述当前使用的现代电源电子系统中观察到的多种不同噪声现象。
- “干扰”一词现在用得有些不够严谨。干扰是指某一设备的实际工作受到另一设备或外界信号源的破坏。除非描述出预防装置、方法或测试, 否则术语EMI一般不意味着实际干扰。
- EMI的两个基本类型：
  - 辐射EMI, 在远场使用天线测量
  - 传导EMI, 在电源入口端使用线路电阻稳定网络 (LISN) 测量。
- 传导EMI有两大类 (本期研讨会的重点) :
  - 差模噪声 (有时称作“正态模式”)
  - 共模噪声

# EMI如何耦合？电子系统中有四个基本噪声耦合机制



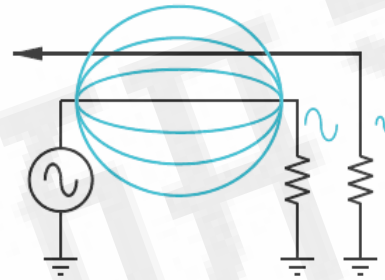
## 传导性

与金属导体直接接触引起的（纹波或接地问题）



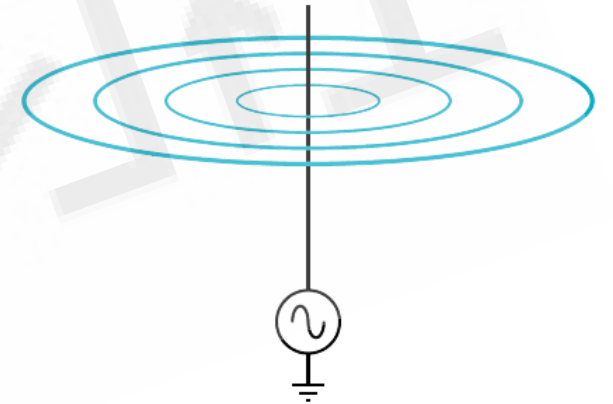
## 电容性

因应用于导体间电容的快速变化电压而引起



## 电感性

由环路中快速变化的电流流动引起的（变压器作用）

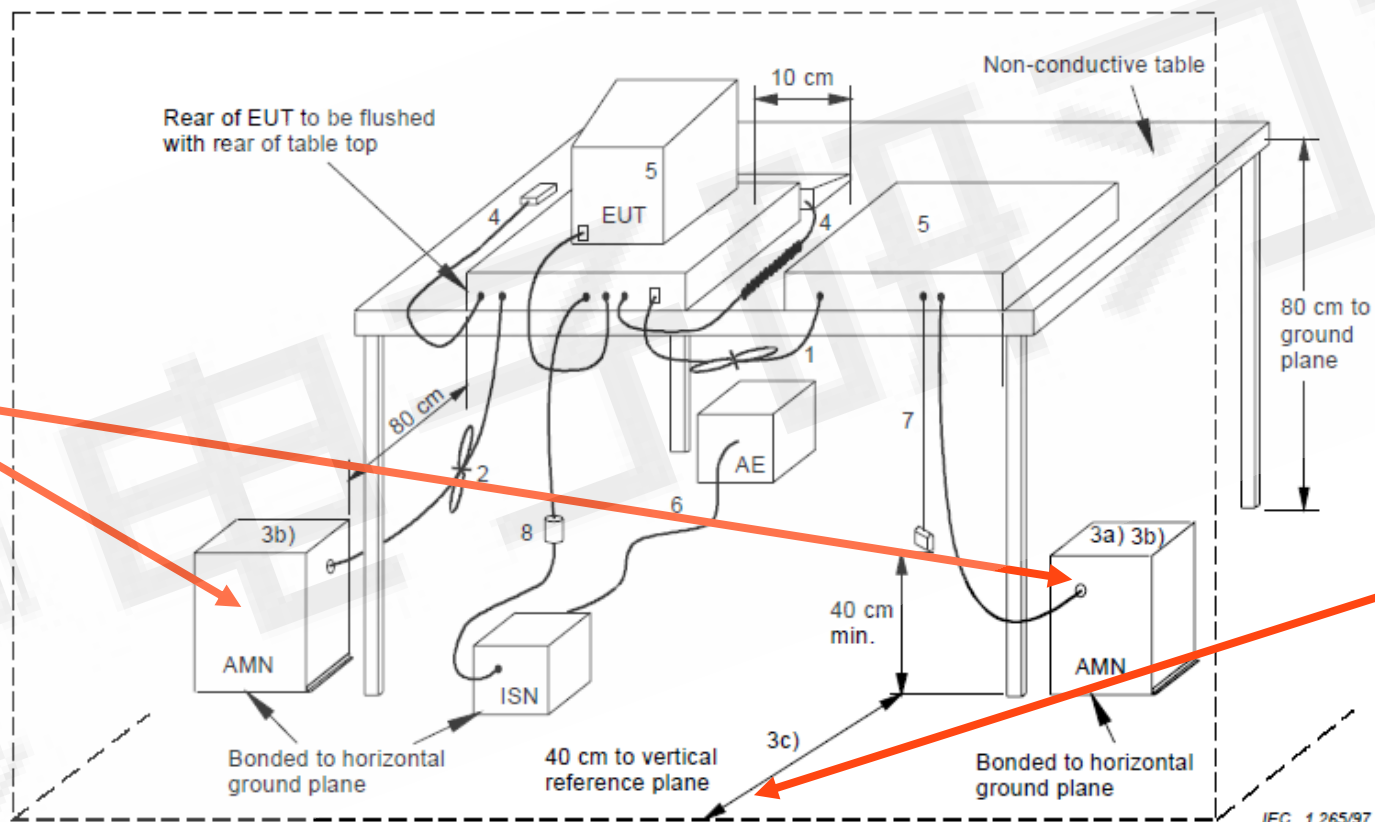


## 辐射性

由远场电磁耦合引起（天线效应）

# 如何在商业设备中测量传导EMI?

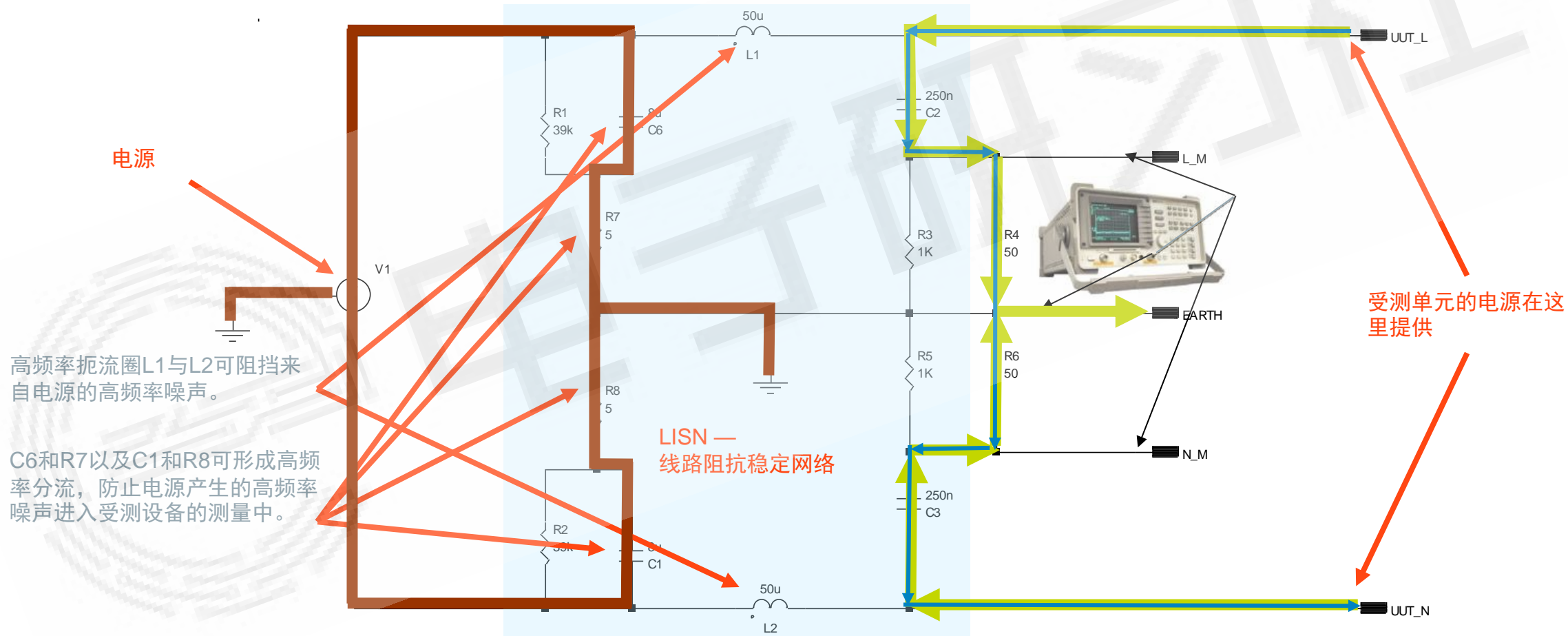
LISN —  
线路阻抗稳定网络



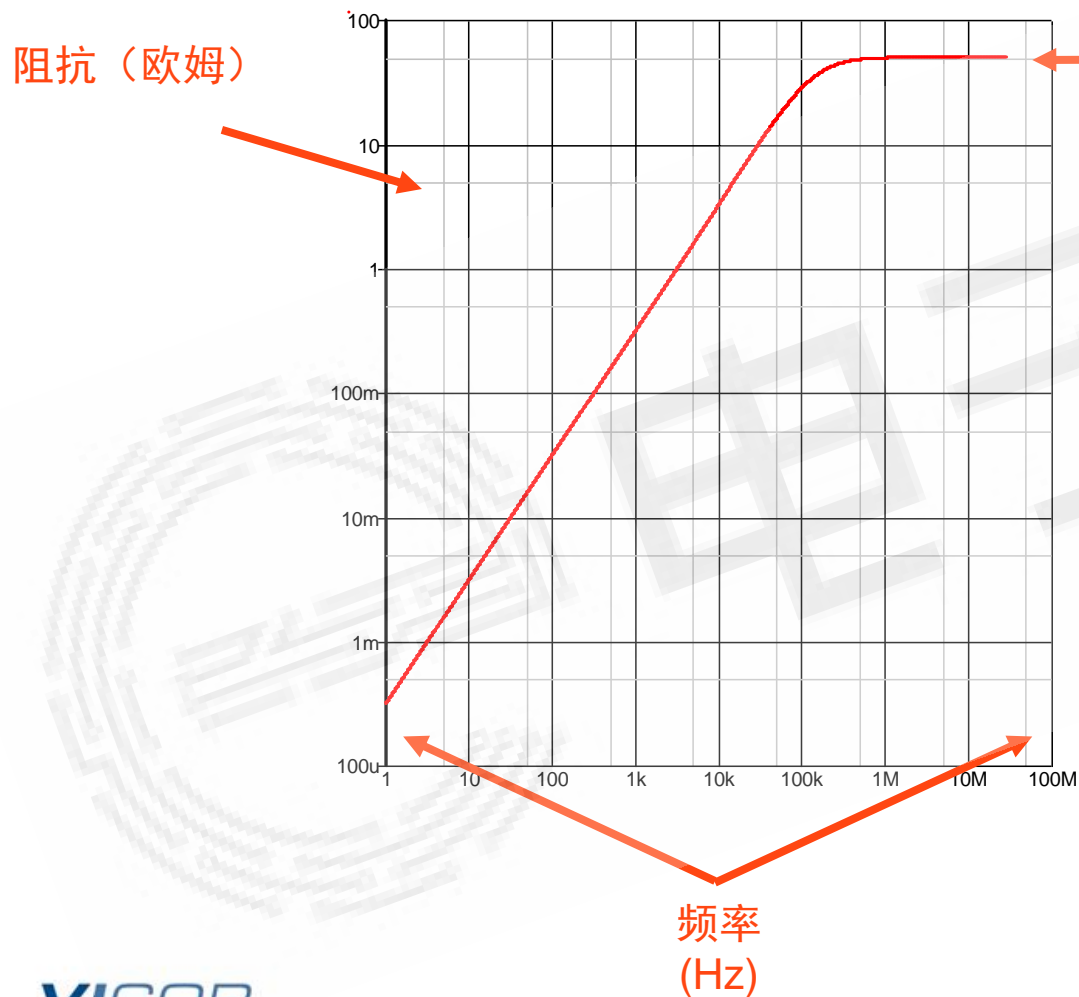
与接地相关联的铜箔接地层

AMN = Artificial mains network  
AE = Associated equipment  
EUT = Equipment under test  
ISN = Impedance stabilization network

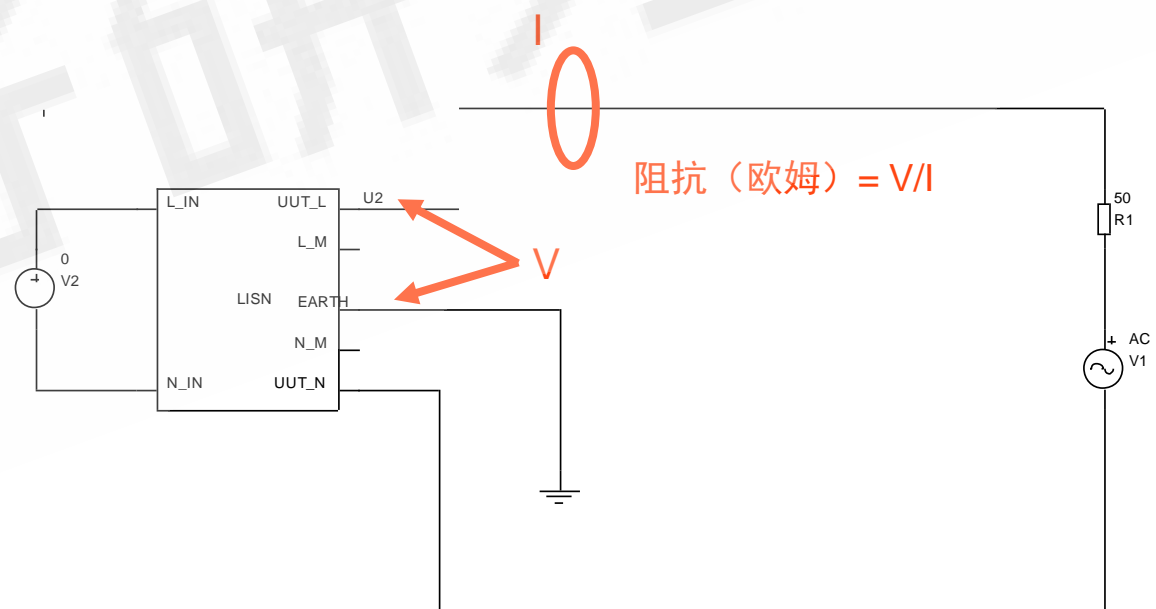
# 线路阻抗稳定网络（商用产品）



# LISN阻抗图（仿真）



阻抗大约是150kHz到300MHz的50欧姆，这是传导EMI的测量标准。LISN会随测量标准变化而变化，但目标是所关注区域的平坦阻抗。





# 测量滤波器

您应该知道的几种测量-滤波技术：

## 峰值检测

这种方法是所有EMI扫描的最快方式。它所生成的振幅结果也是最高的。

使用包络探测器可以非常快速地响应振幅变化，但无法跟踪输入信号的瞬态值。

## 准峰值检测

该检测法是一种加权平均的形式，具有快速

上升时间常数和缓慢下降时间常数。

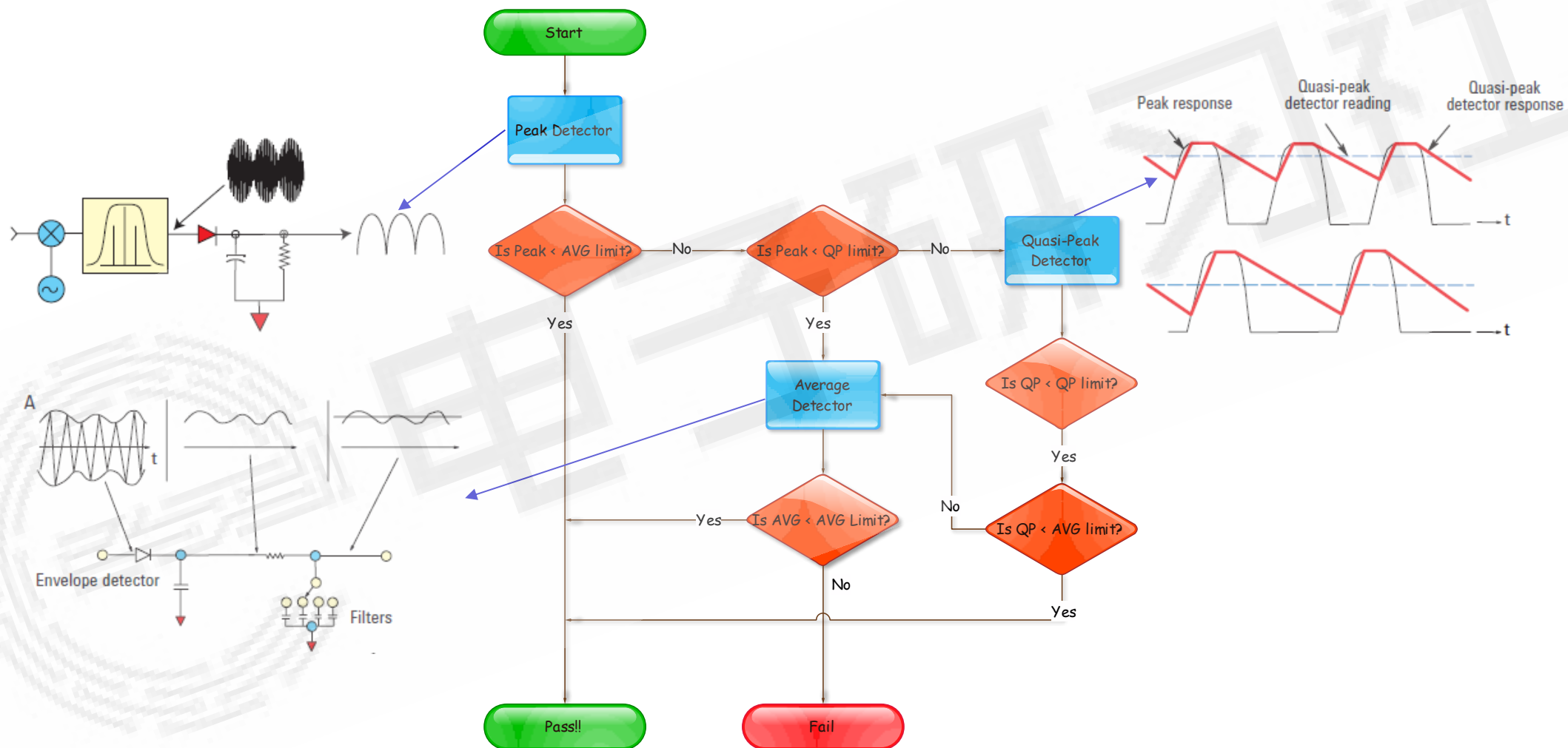
窄占空比信号将测得比峰值低的值，但随着频率或占空比的上升，测量值就会开始接近峰值检测。准峰值检测在所有EMI扫描中耗时最长。准峰值检测具有较高的限制，允许攻击性信号中有“干扰因数”。

## 平均值

该方法会在峰值检测后使用一种带宽比分辨率带宽低的滤波器。

结果表明，频率峰值越高，平均值越低。平均值检测速度比峰值慢，但比准峰值快。

# 测量流程



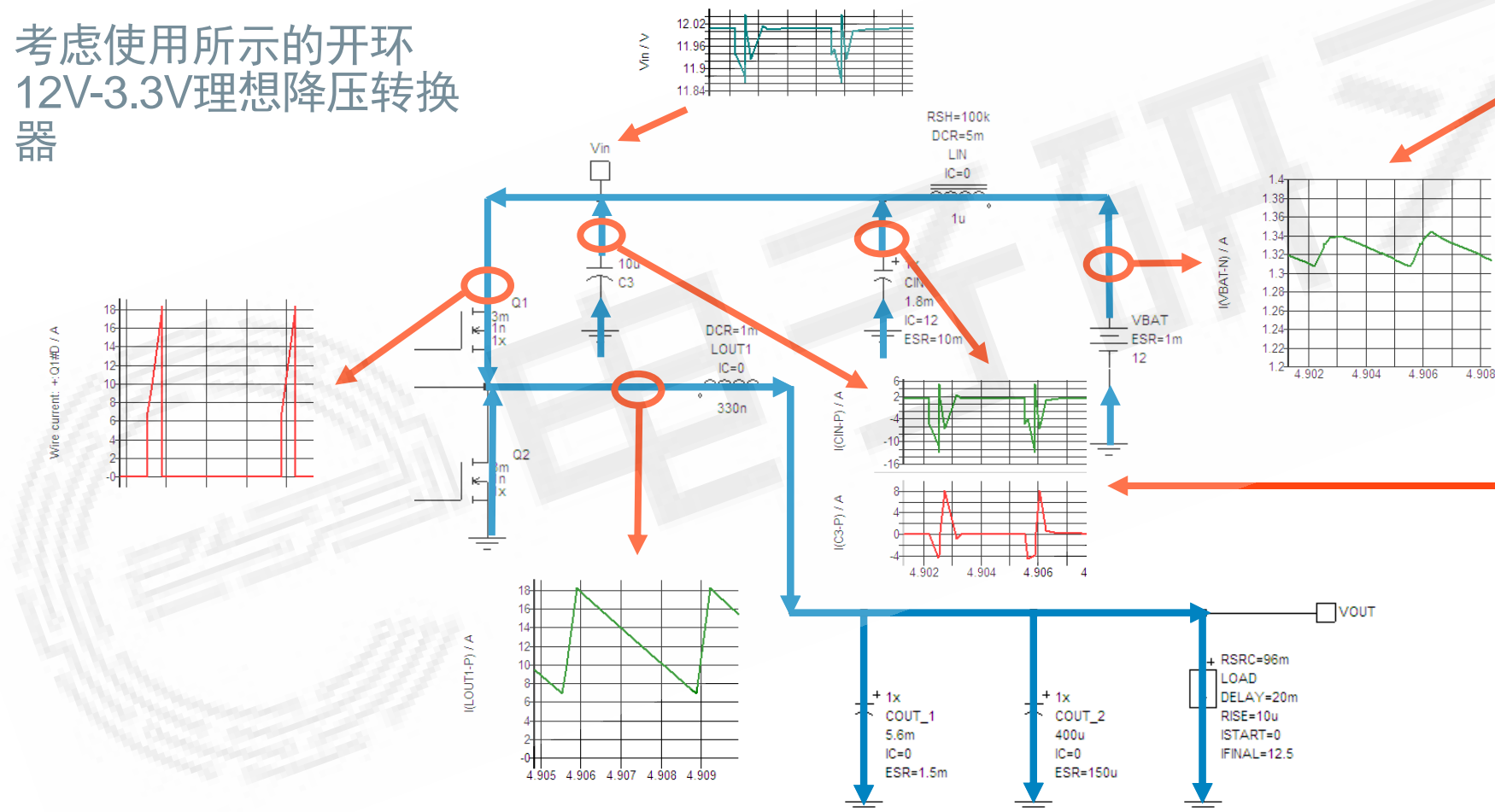
# 差模噪声

## （也叫正态模式）

- 差模噪声有时也叫正态模式噪声，这是有原因的。它是由噪声源和噪声返回之间施加的电压差异（相反极性）而产生
- 可能因上述四种耦合方法中任意一种或全部四种（希望不会！）而产生
- 正常的电路工作在本质上也是差动性的
- 差模噪声只需要两根电线或一根电线和接地
- 差模噪声电流在输入馈电或AC线与零线间，以相反方向流动
- 输入电压纹波和输出电压纹波是差模噪声中常见的实例
- 差模噪声会以所有的馈电形式出现：包括双线和三线馈电

# 差模噪声理想的CCM降压转换器模型SIMPLIS

考虑使用所示的开环  
12V-3.3V理想降压转换器

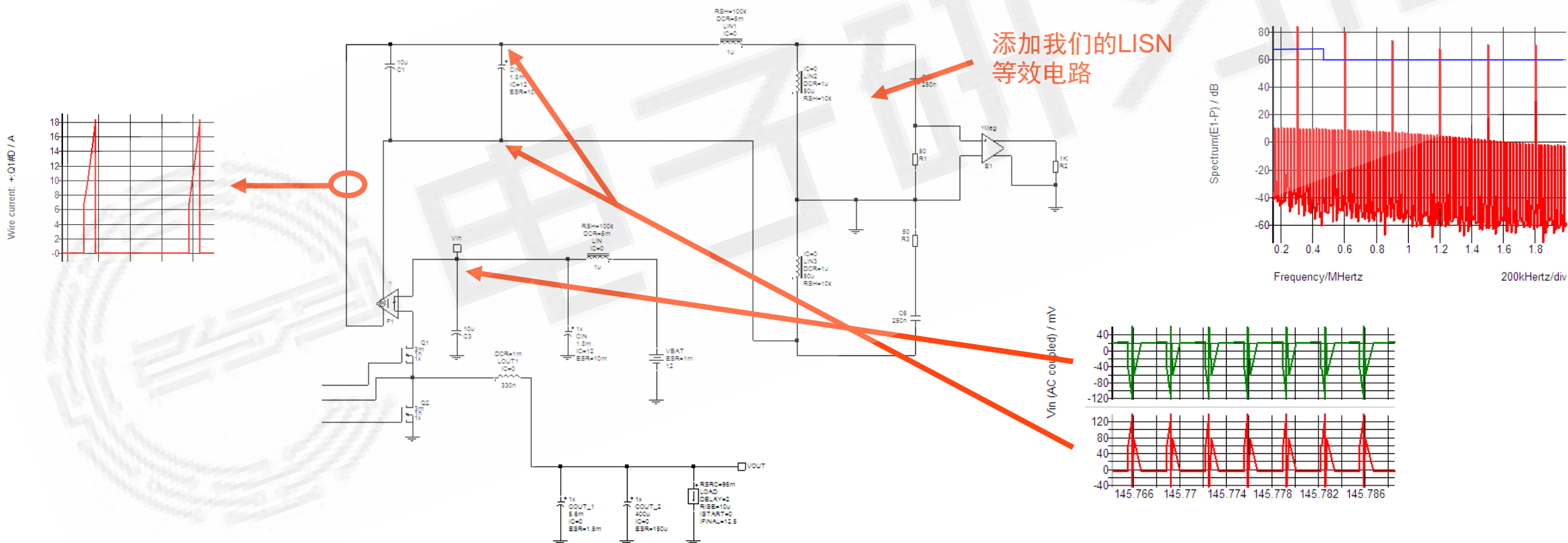


该纹波电流负责将在LISN中测量的差模EMI。

我们关注这些纹波电流，因为它们负责节点 $V_{in}$ 上测得的纹波电压。这种纹波电压是在基波以及大量谐波含量中出现的差模EMI的来源。

# 差模噪声理想的降压转换器

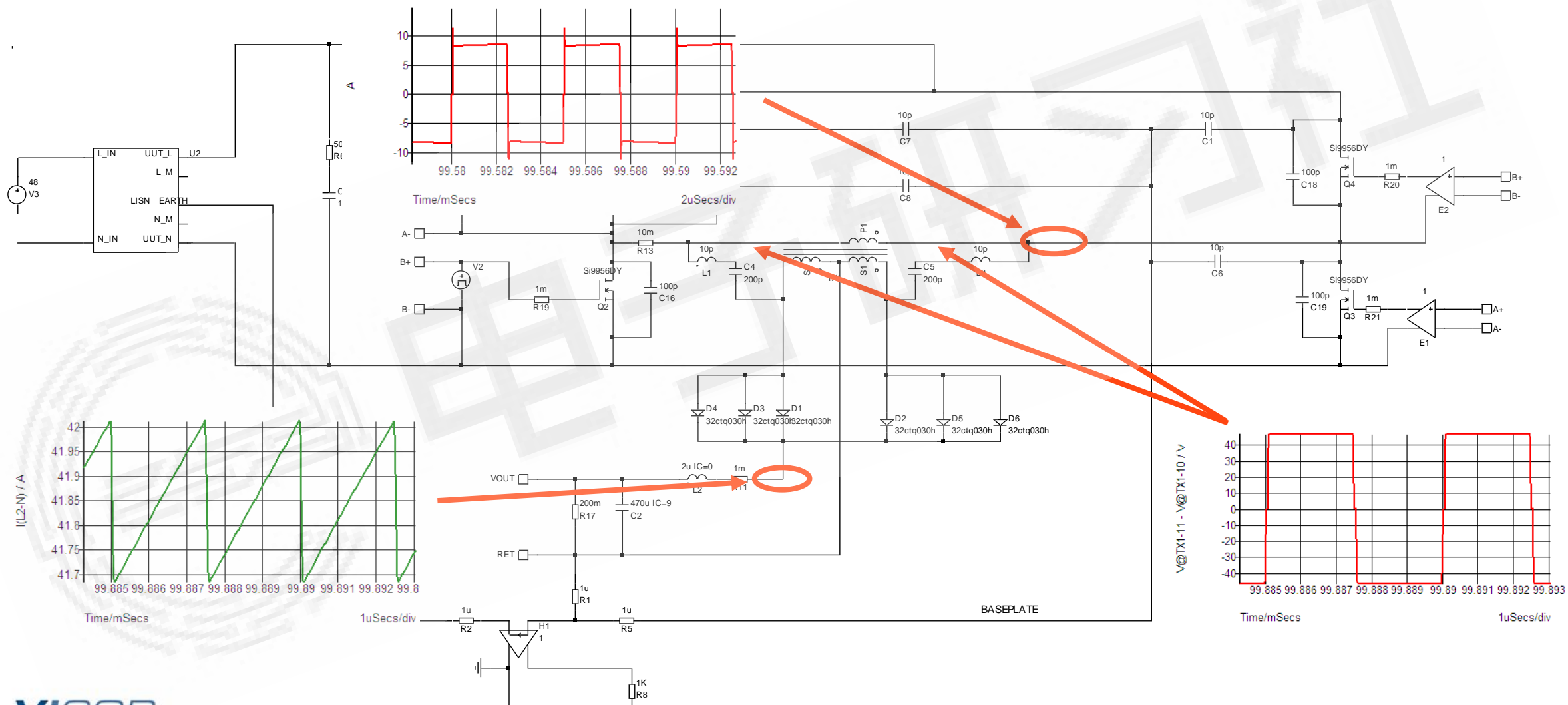
为了生成噪声模型，我们对线路做了如下修改：



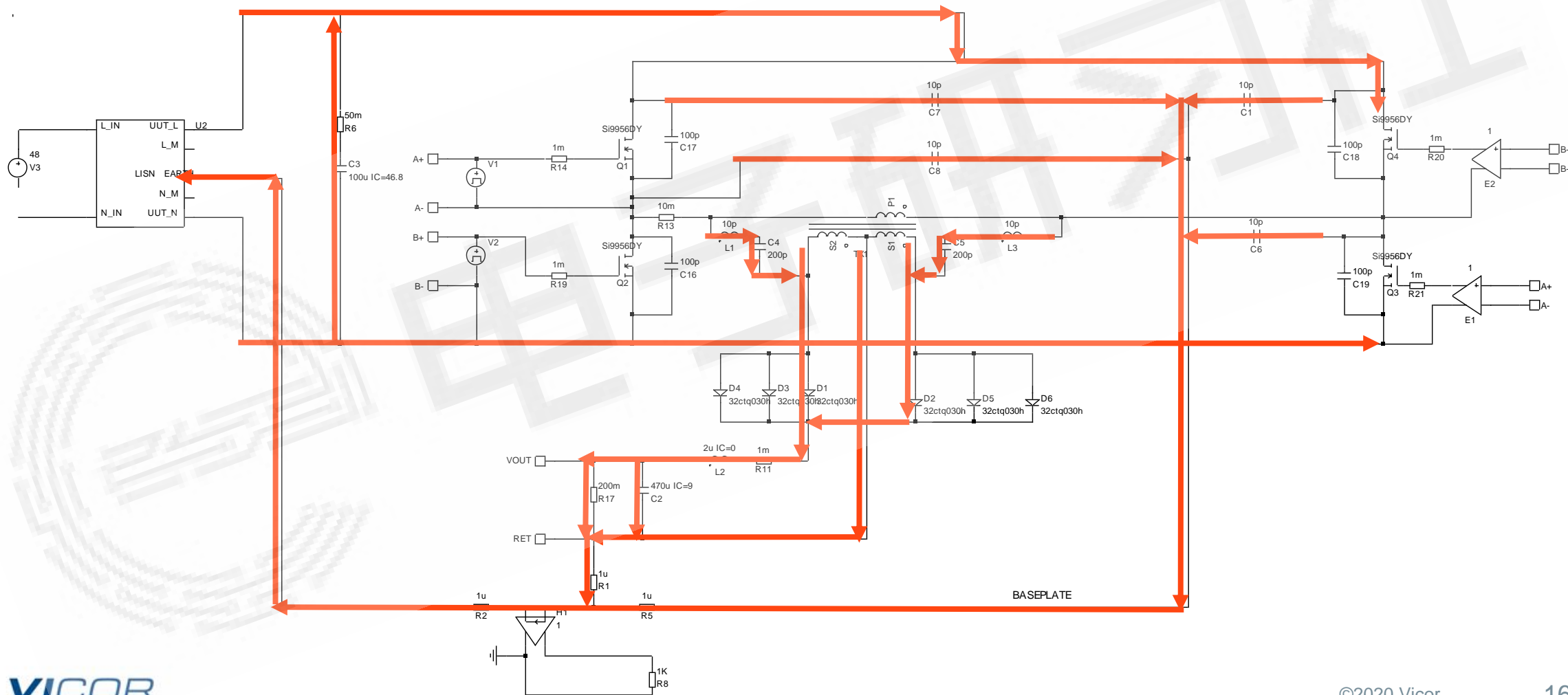
# 共模噪声

- 共模噪声总是在两个输入馈电（L与N）中从施加在线路与接地（底座、基板和测试设备等）之间的电压，以相同的方向流动。
- 其路径可能是最难确定的，因为它几乎涉及所有连接接地的设备。
- 需要接地或具有隔离接地的三线系统。
- 非隔离式DC-DC转换器无需考虑太多共模噪声的问题（有时！！）。
- 基于此类被测电路，测试设备可能很容易受到影响。
- 将输出（-）连接至接地的隔离式转换器会在输出端产生共模+差模纹波。
- 如果接地测试设备间有高共模噪声在流动，那么共模噪声可对非隔离式DC-DC转换器造成影响。

# 共模噪声源 — 隔离式全桥拓扑

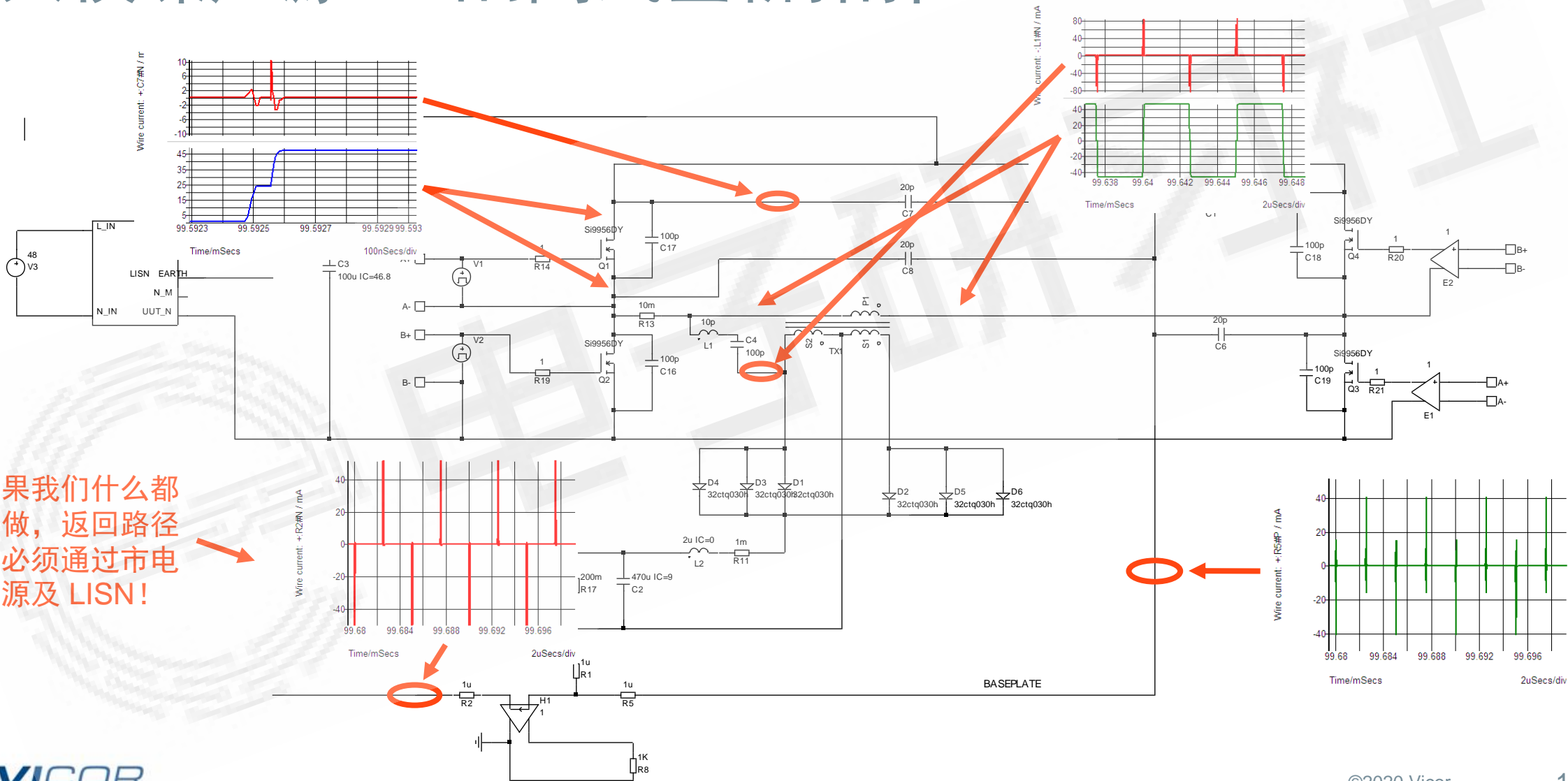


# 共模噪声源 — 隔离式全桥拓扑



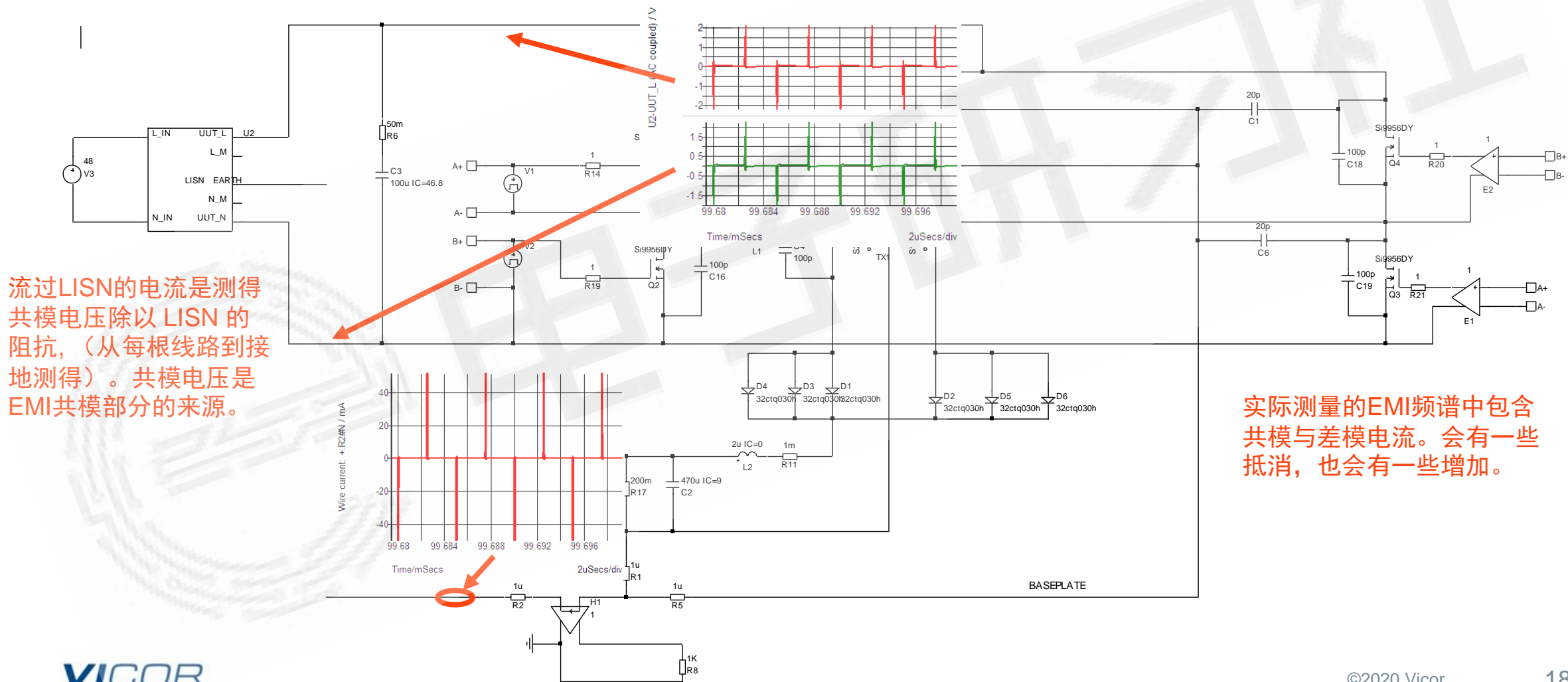


# 共模噪声源 — 隔离式全桥拓扑



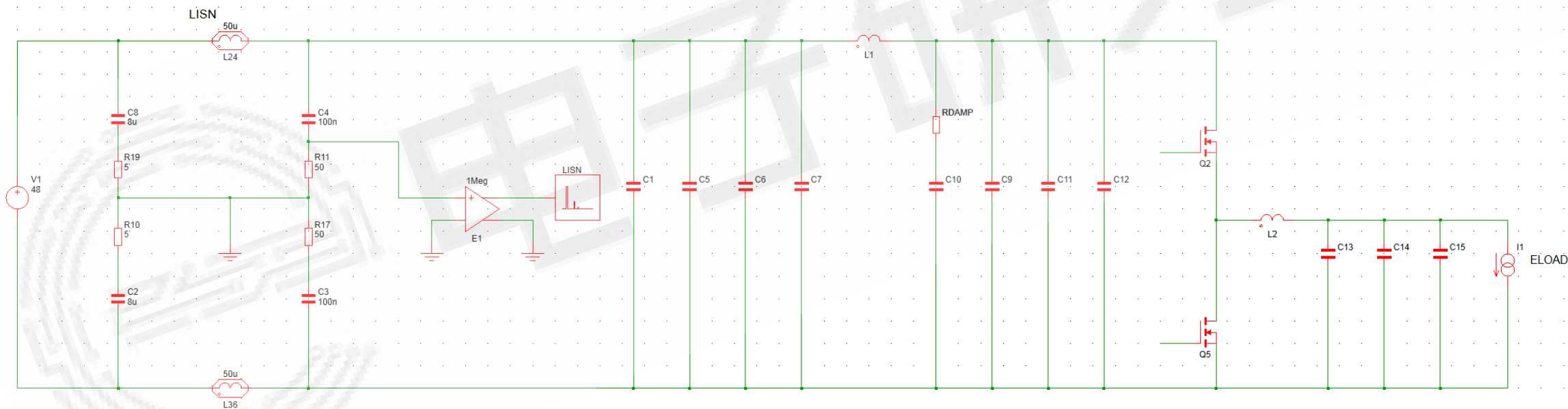
如果我们什么都不做，返回路径就必须通过市电电源及 LISN!

# 共模噪声源 — 隔离式全桥拓扑



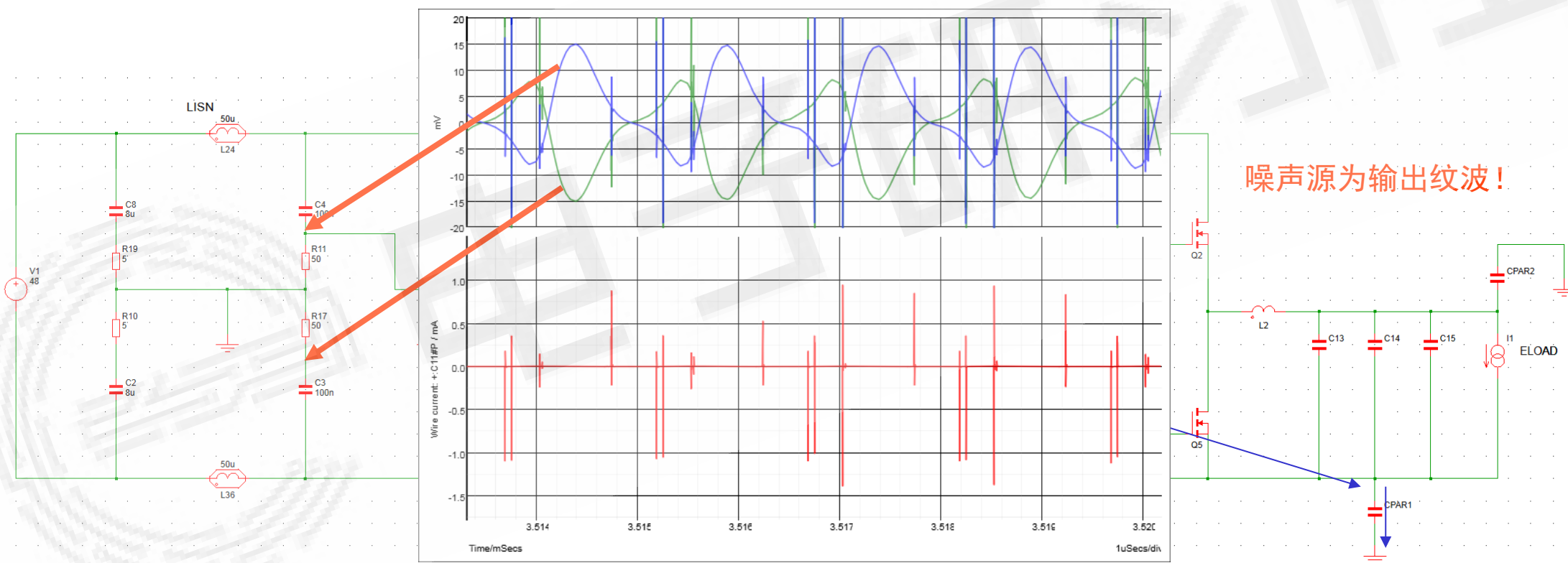
# 降压稳压器什么时候会产生共模噪声？

- 考虑如下所示的与电子负载相连接的简化降压稳压器
- 由LISN供电，用来测量EMI。谁能找出共模EMI源？



# 接地什么时候会有寄生电容

在LISN的电压, 对地同相的是为共模EMI, 反相的是为差模EMI。



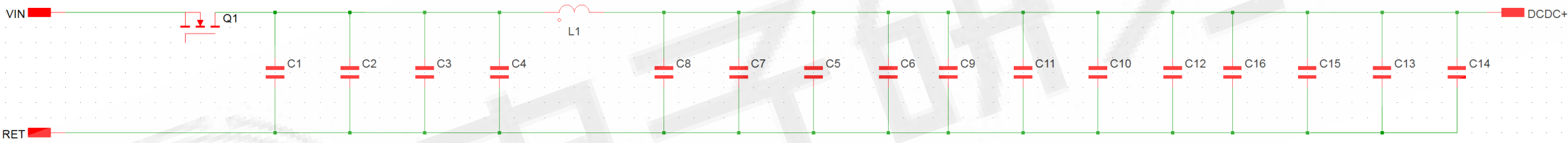
噪声源为输出纹波!

流过寄生电容的电流, 在每个50欧姆到接地端口测量时, 以同相电压出现在LISN!

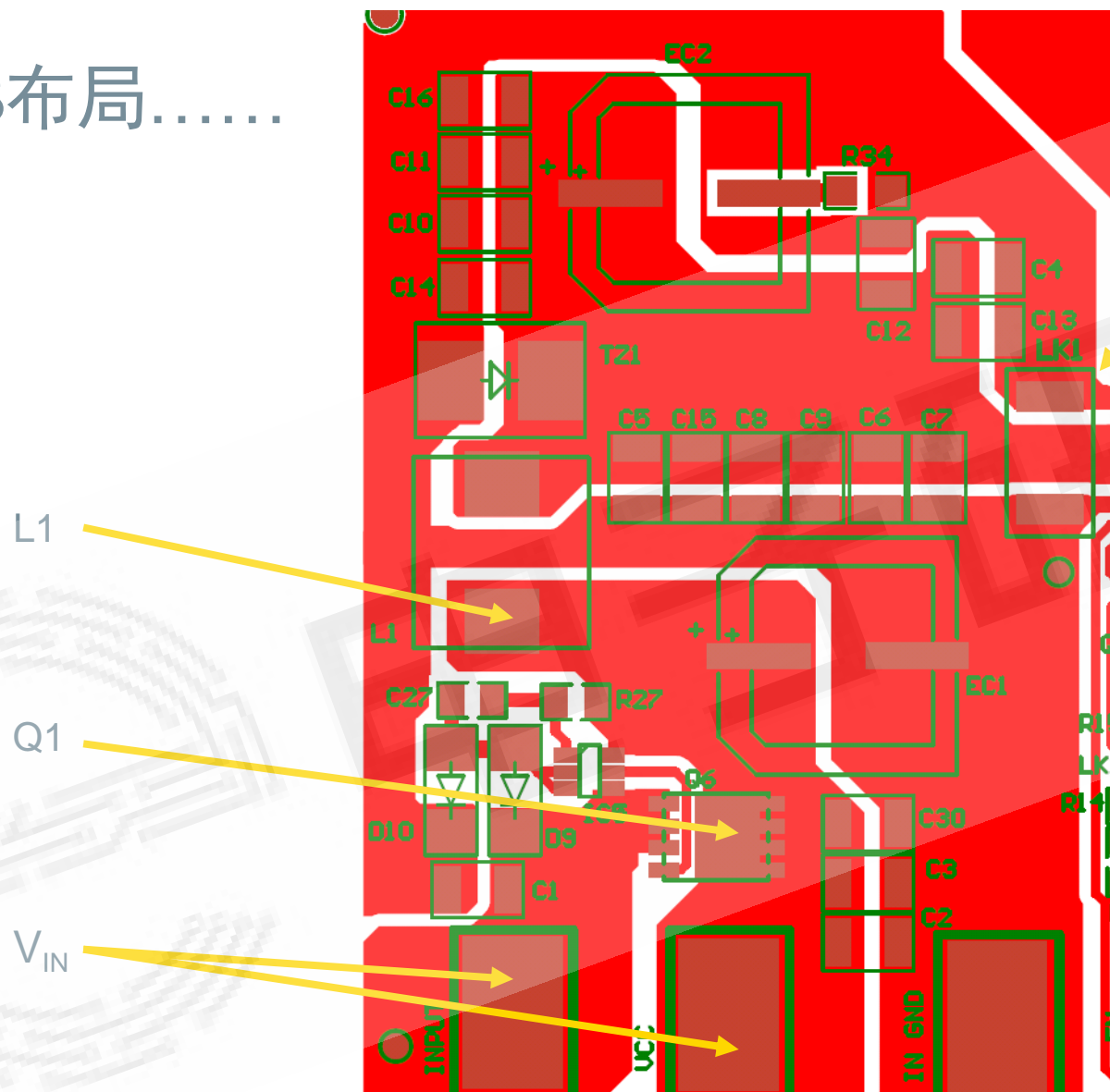
# 布局很重要！

- 到目前为止，我们一直在仿真和讨论理想布局的滤波器。根本就不存在理想的布局。大多数布局都有妥协，因为有许多资源都需要PCB面积。
- 寄生电感出现ESL时，将限制电容的高频率性能！
- 若PCB布局不做到优化滤波器的性能，可使您的滤波器需要更多级。
- 没有专用接地层的双面PCB，很难实现最佳滤波效果。
- 您还可以为每个互连通孔和迹线的电感及电阻建模。
- 提取寄生电感和电阻，对于了解潜在的EMI来源（振铃）以及EMI滤波器的整体性能十分重要。

# 从原理图.....



到PCB布局.....



PGND的铜箔连接

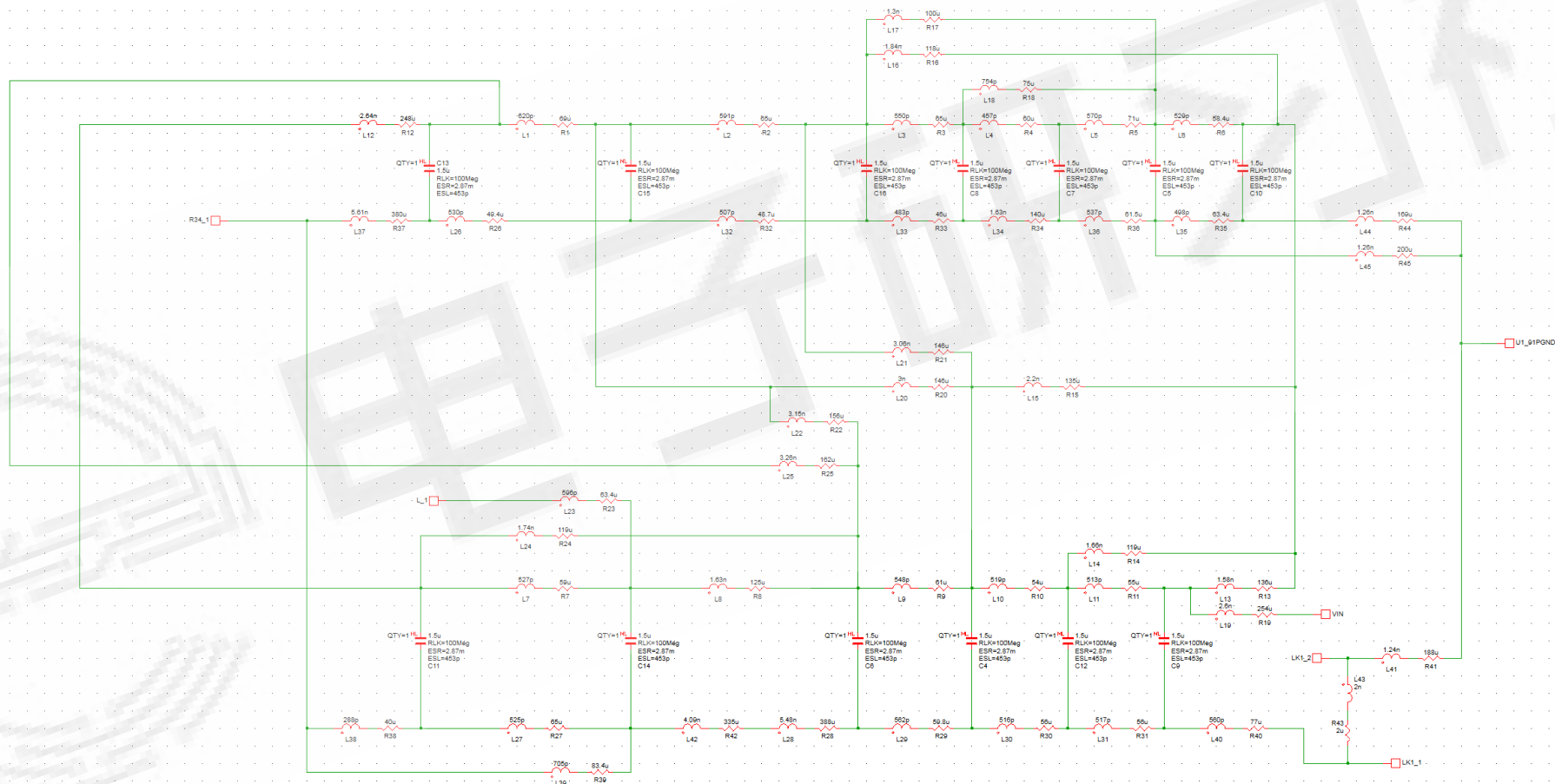
PGND

HS MOSFET漏极

PGND

环路周围的寄生路径必须在最终仿真与分析中考虑到，否则您会发现，滤波衰减就不那么准确。使用理想的滤波器原理图生成一个通过的结果，然后根据布局进展对其进行修改，以便更好地考虑实际布局。

# 所提取的从L1到HS MOSFET-漏极及PGND的布局





# 工具 — Beehive 100

- 包含宽带射频放大器和线缆
- 3 颗 H 场探针和1 颗 E 场探针
- 100D是最右侧的 E 场探针
- 按套件购买，必备！



为小场探针使用放大器，因其灵敏度较差。较大的探针可帮助您找到攻击性信号的大致区域，而较小的探针则可帮助您更密切地对其进行追踪。

# 工具 — 功率分配器

- ZSCJ-2-2+ Mini-Circuits
- 阻隔共模
- ZSC-2-2+ Mini-Circuits
- 阻隔差模
- 都需要双LISN或两个单个LISN
- 必须使用匹配的、长度相同的同轴线缆。长度尽量要短



LISN-L

LISN-N

LISN-L

LISN-N

分析器

分析器

衰减同相信号

衰减反相信号

# 工具—Swartzomatic-1

- 手绕式HF电流探针
- 测量CM及DM电流
- 高导磁率磁心
- 50欧姆线缆
- 宽BW，高灵敏度
- 与传统电流探针相比，更适合  
振幅极低的高频率电流。



将电线以相同方向穿过磁心，可测量共模电流，  
以相反方向穿过磁心，则可测量差模电流。

## 工具—Swartzomatic-2

- 手绕式近场探针
- 有助于在PCB上找到高H场
- 使用RG-58U手工制作
- 50欧姆线缆
- 共模磁珠可以作为一个选项添加至线缆



连接至示波器上50欧姆的终端。在PCB上移动时，从较高的volts/div开始。随后降低volts/div，以便确定近场位置。再然后使用敏感度较低的探针（Beehive）跟踪所关注的噪声电流带来的攻击性H场。在不连接电路的情况下，实现优异的触发器。

# 故障排除 — 设计挑战

## ■ 250W+临界传导降压稳压器

- 效率必须是96%以上，开关频率高达700kHz
- PCB面积小、隔离金属盒外壳，密封。
- 高达65° C的高环境温度

## ■ 热管理

- 电源SiP和PCB需要与底盘进行热连接，以便散热。
- 这导致接地层不太理想，增加了寄生电感。

## ■ CISP25传导EMI

- 需要双级滤波器，因第二谐波需-40dB的衰减

# 工具 — 为我所用

## ■ 功率级与滤波器设计的优异仿真模型

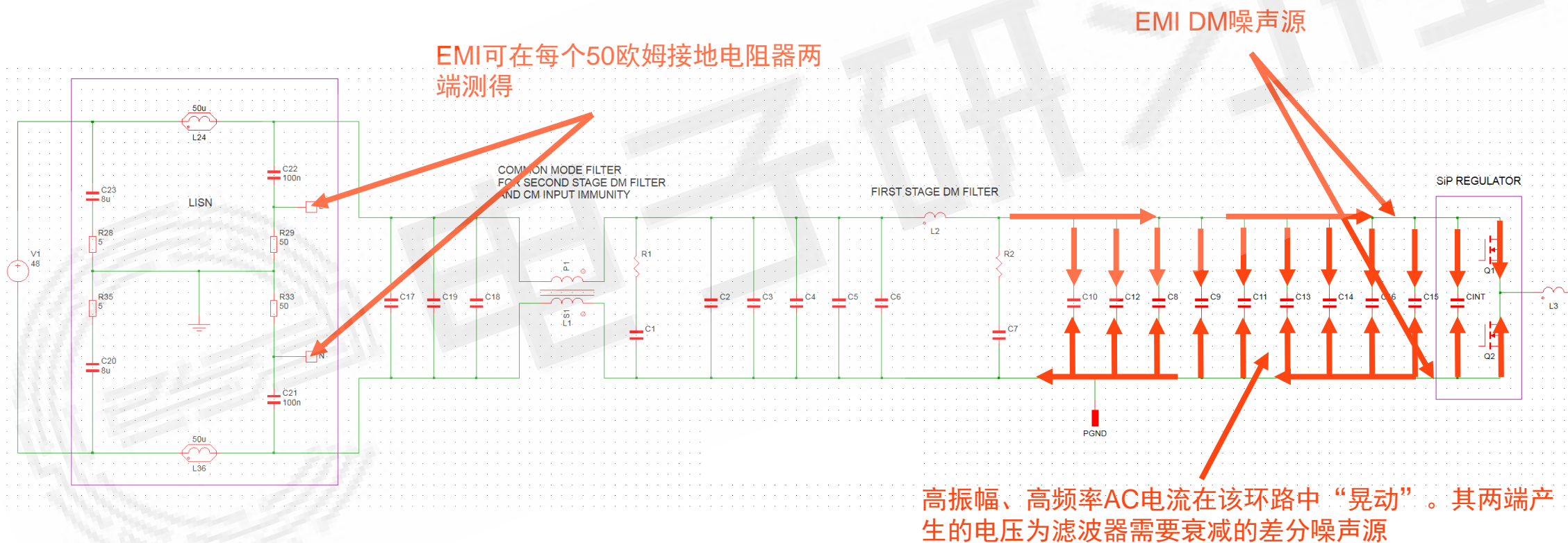
- 对带滤波器的电源系统执行了AC及瞬态分析，无任何问题
- 在分析结束后对布局进行了寄生提取。

## ■ 测试设备

- 前面显示的所有工具，加上频谱分析仪和示波器。
- LISN、差分放大器 and 一款良好的网络分析仪。

# EMI故障排除 — 所用的滤波器

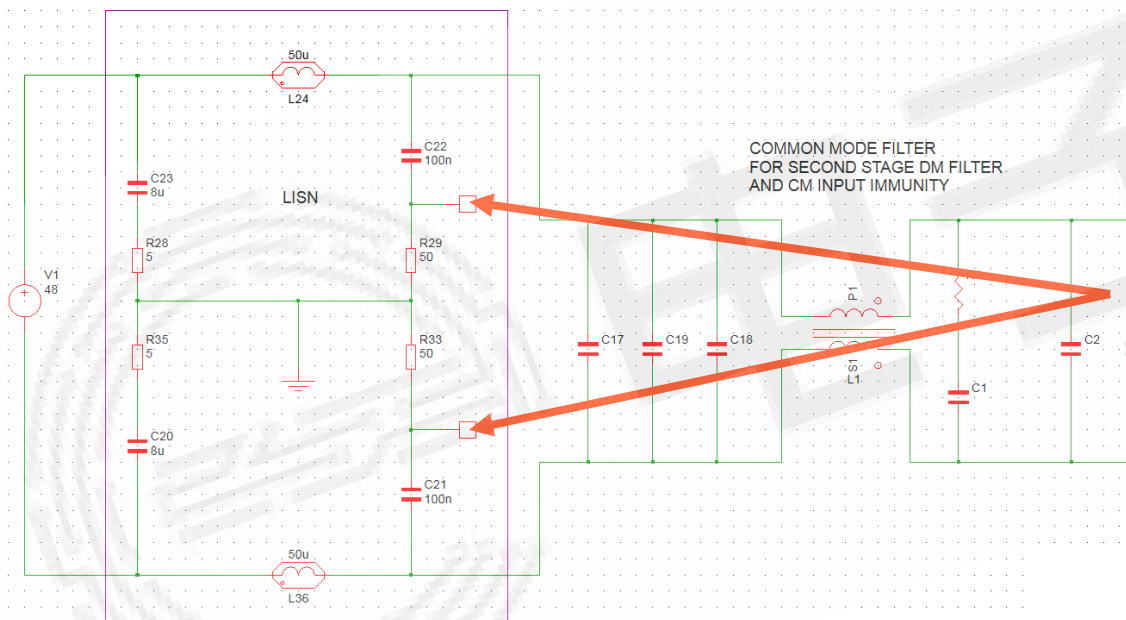
为了便于说明，EMI滤波器显示如下（理想化）



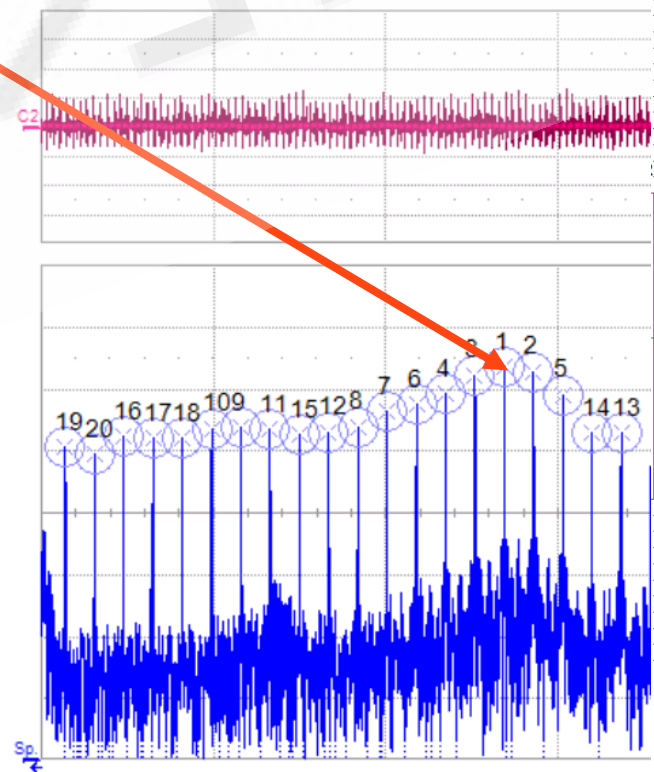
# EMI故障排除 — 初期测量

受初期测量启发，我写了一本名为《您以为您了解EMI》的新书！ 😊

高频率EMI完全出于意料。唯一与预期一致的是基频。



Peaks	Frequency	Amplitude
1	8.1583 MHz	63.4221 dBμV
2	8.6682 MHz	62.7268 dBμV
3	7.6484 MHz	62.0954 dBμV
4	7.1385 MHz	59.0767 dBμV
5	9.1781 MHz	58.8904 dBμV
6	6.6287 MHz	57.3537 dBμV
7	6.1187 MHz	56.1336 dBμV
8	5.6088 MHz	53.7328 dBμV
9	3.5693 MHz	53.6681 dBμV
10	3.0594 MHz	53.4649 dBμV
11	4.0792 MHz	53.2542 dBμV
12	5.0990 MHz	52.9415 dBμV
13	10.1979 MHz	52.7300 dBμV
14	9.6880 MHz	52.7015 dBμV
15	4.5891 MHz	52.5385 dBμV
16	1.5297 MHz	52.2561 dBμV
17	2.0395 MHz	51.9603 dBμV
18	2.5495 MHz	51.8715 dBμV
19	509.9 kHz	50.4446 dBμV
20	1.0198 MHz	49.3241 dBμV



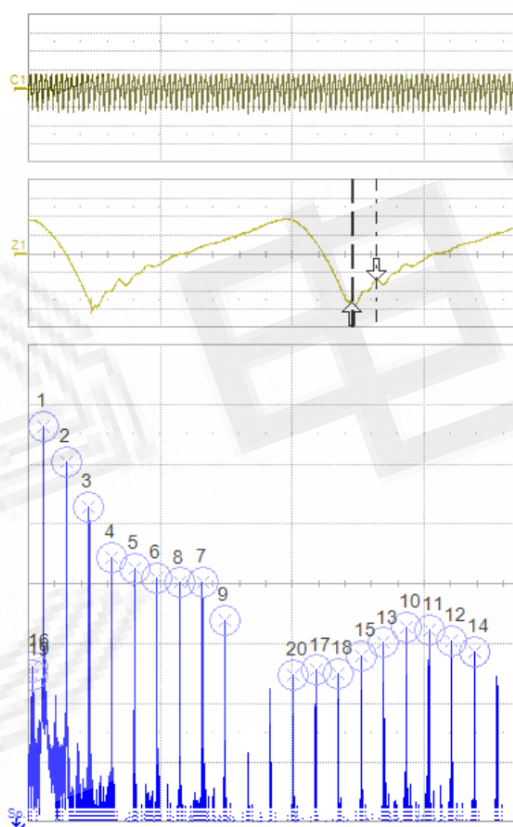


# EMI故障排除 — 初期测量

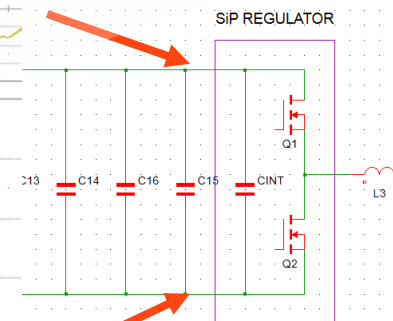
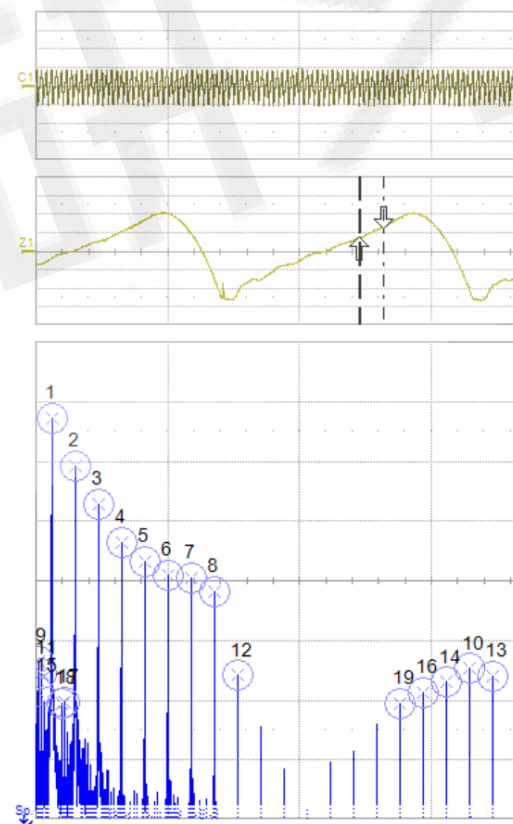
在客户电路板上的SiP输入端测得DM信号：高频率  
(6-10MHz) 高出8-12dB，能感觉到非常明显的振铃。

DM信号在接地层更好的评估板上测量。

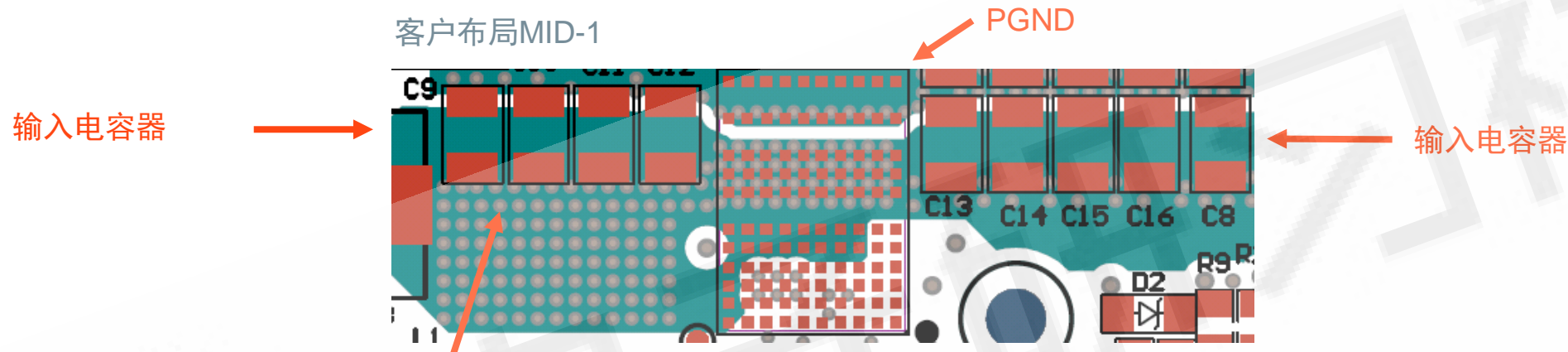
Peaks	Frequency	Amplitude
1	512.7 kHz	106.282 dB $\mu$ V
2	1.0254 MHz	100.282 dB $\mu$ V
3	1.5380 MHz	92.7580 dB $\mu$ V
4	2.0507 MHz	84.1562 dB $\mu$ V
5	2.5634 MHz	82.3457 dB $\mu$ V
6	3.0761 MHz	80.7273 dB $\mu$ V
7	4.1015 MHz	80.0420 dB $\mu$ V
8	3.5888 MHz	80.0107 dB $\mu$ V
9	4.6142 MHz	73.7851 dB $\mu$ V
10	8.7157 MHz	72.5730 dB $\mu$ V
11	9.2283 MHz	72.2168 dB $\mu$ V
12	9.7409 MHz	70.3115 dB $\mu$ V
13	8.2030 MHz	69.9668 dB $\mu$ V
14	10.2535 MHz	68.4108 dB $\mu$ V
15	7.6903 MHz	67.8472 dB $\mu$ V
16	267.0 kHz	65.9995 dB $\mu$ V
17	6.6649 MHz	65.3908 dB $\mu$ V
18	7.1776 MHz	64.7504 dB $\mu$ V
19	246.0 kHz	64.6311 dB $\mu$ V
20	6.1522 MHz	64.5793 dB $\mu$ V



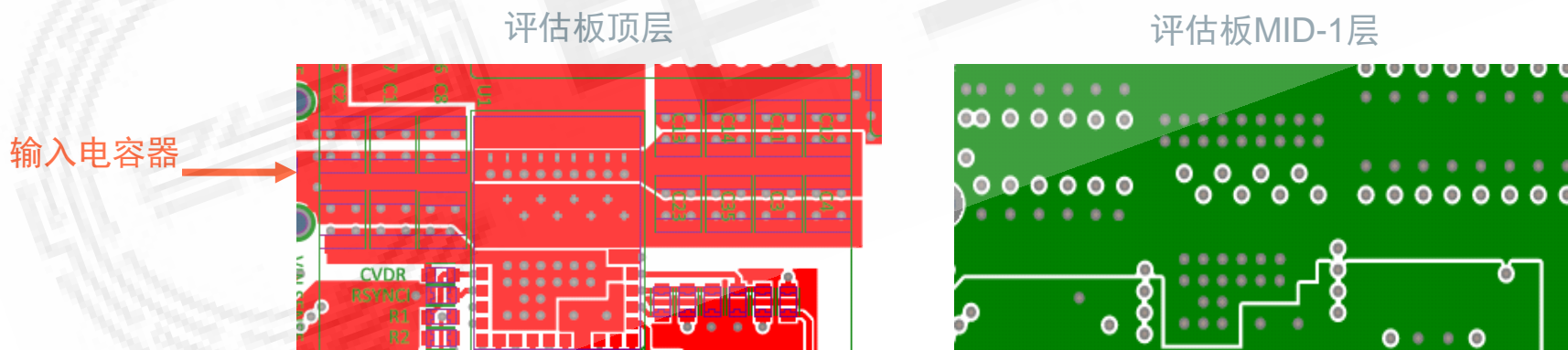
Peaks	Frequency	Amplitude
1	525.5 kHz	107.144 dB $\mu$ V
2	1.0509 MHz	99.1488 dB $\mu$ V
3	1.5764 MHz	92.6918 dB $\mu$ V
4	2.1018 MHz	86.2262 dB $\mu$ V
5	2.6273 MHz	83.1736 dB $\mu$ V
6	3.1527 MHz	80.7635 dB $\mu$ V
7	3.6782 MHz	80.4213 dB $\mu$ V
8	4.2036 MHz	78.1610 dB $\mu$ V
9	237.4 kHz	66.4721 dB $\mu$ V
10	9.9837 MHz	65.1480 dB $\mu$ V
11	288.0 kHz	64.3286 dB $\mu$ V
12	4.7291 MHz	64.0228 dB $\mu$ V
13	10.5092 MHz	63.8556 dB $\mu$ V
14	9.4581 MHz	62.8661 dB $\mu$ V
15	186.9 kHz	61.4649 dB $\mu$ V
16	8.9328 MHz	61.1135 dB $\mu$ V
17	813.9 kHz	59.5388 dB $\mu$ V
18	762.9 kHz	59.4055 dB $\mu$ V
19	8.4073 MHz	59.2458 dB $\mu$ V



# EMI故障排除 — 接地层差异



VIN为主要热源,客户的设计需所有的4层来带走,以形成坚固散热盘结合到冷板。注意,需要大量通孔将热负载通过电路板传递给散热盘。接地层被破坏。



注意,接地层只能被一小部分通孔破坏,周边堆满了铜。寄生电感更低,但热阻抗太高,无法满足散热需求。

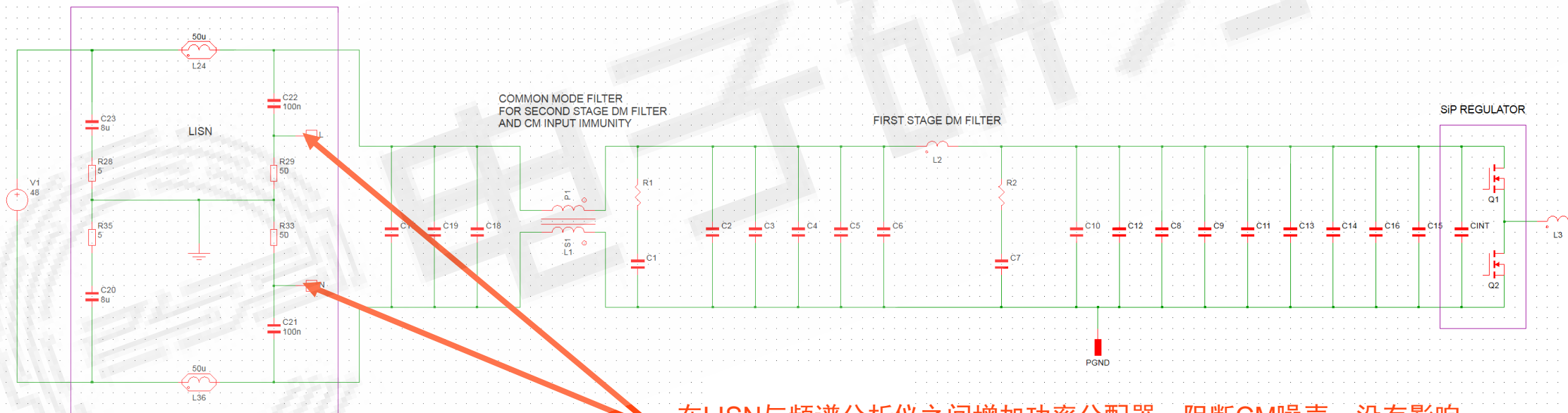
# EMI故障排除 — 我知道的和我不知道的 — 下一步是什么？

- 在输入至SiP端测得的EMI表明，在EMI失效的区域有明显的高频率振铃。
- 我认为这种振铃是由于布局更高的寄生电感及更高Q噪声环路导致的
- 该频率是如何通过EMI滤波器的？滤波器是否有缺陷？
- 噪声是否会绕过滤波器？
- 近场被电感器中的高通量所污染？
- 高电压跳动引起的电容耦合？
- 辐射EMI进入LISN？
- 是共模噪声，还是差模噪声？

# EMI故障排除 — 下一步

确定噪声是CM，还是DM.....

EMI可在每个50欧姆接地电阻器两端测得

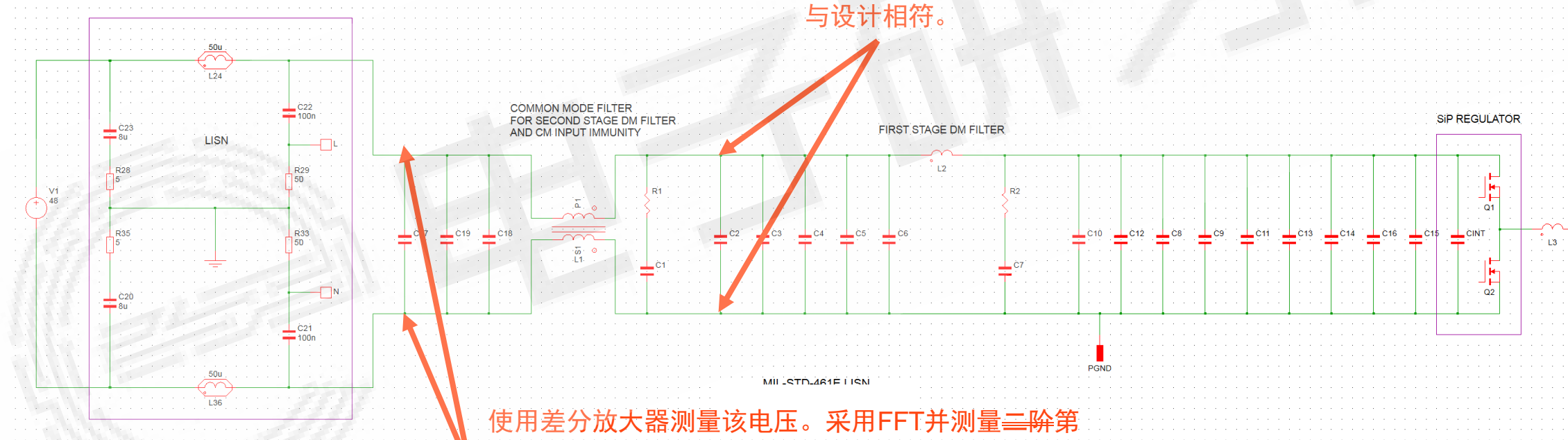


在LISN与频谱分析仪之间增加功率分配器。阻断CM噪声，没有影响高频测量。阻断DM噪声，可将所有高频发射降低30dB  
结论：攻击性信号为差分信号

# EMI故障排除 — 下一步

确定EMI滤波器的哪些部分工作正常.....

使用差分放大器测量该电压。采用FFT并测量第一级滤波器的衰减。  
- 与仿真预期结果匹配吗？接近！第一级工作情况似乎与设计相符。

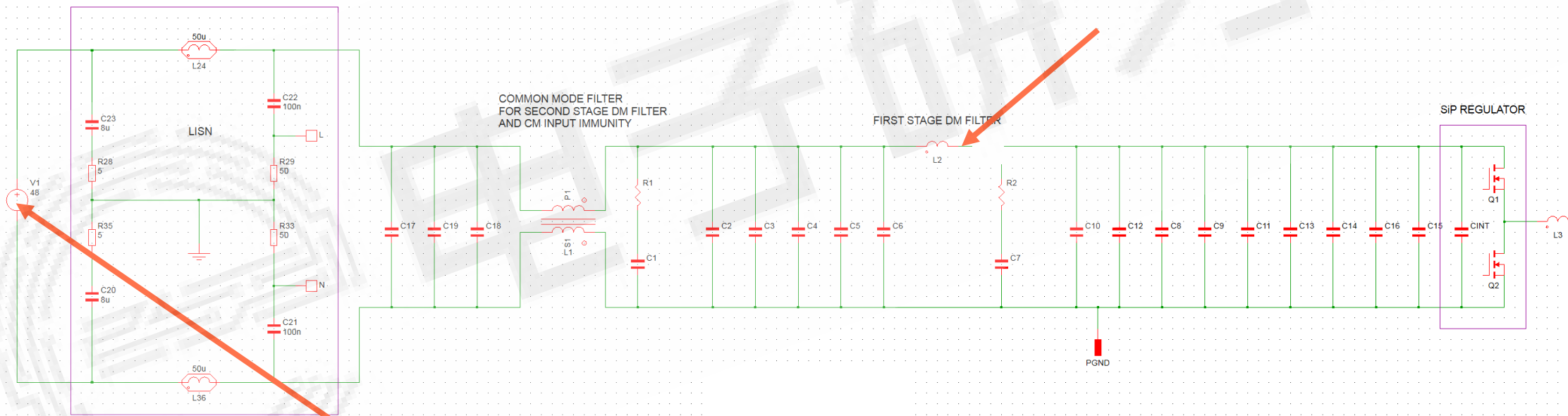


使用差分放大器测量该电压。采用FFT并测量二阶第二级DM滤波器的衰减。  
- 与仿真预期结果匹配吗？不能！  
这里有8MHz及其它高频率噪声。  
与仿真完全不相关。

# EMI故障排除 — 下一步

检查第二级滤波器的仿真模型。  
有没有漏掉的东西，如电感器磁心的自谐振？

打开电路并使用网络分析仪对两个滤波器进行扫描  
- 仿真中出现的衰减接近吗？接近！  
第一级及第二级滤波器看来在小信号方面工作正常。



移除LISN的48V和短路输入

# EMI故障排除 — 下一步

使用场探针隔离出污染源位置

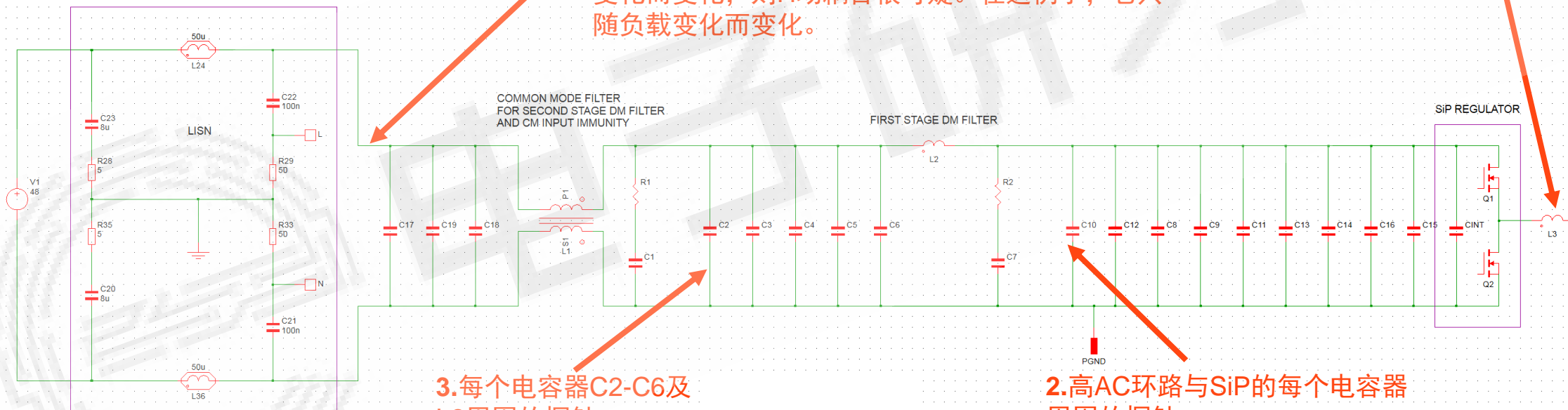
1.最高H场是电感器。起点很好。

- 能证明这里的8MHz在发出振铃声吗？不能！这里没有证据，也不在输出电容器。

4.检测到探针C17-C19.8MHz及其它频率！接下来，改变输入电压。

- EMI振幅是否会随输入上升而增加？

如果会，这可能预示着电容耦合。如果EMI随负载变化而变化，则H场耦合很可疑。在这例子，它只随负载变化而变化。



3.每个电容器C2-C6及L2周围的探针。

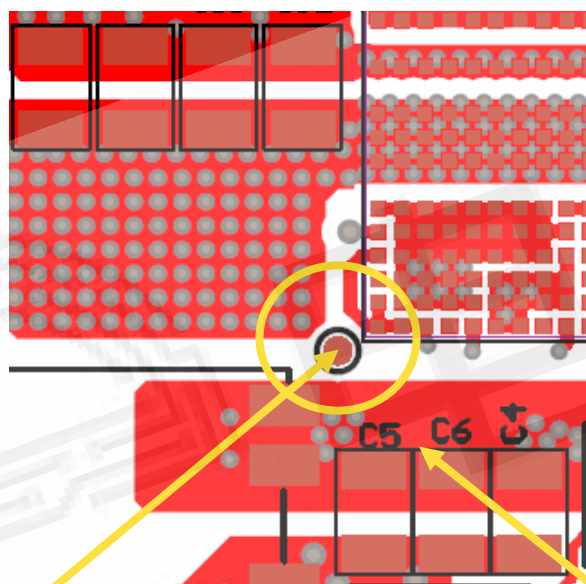
- 有8MHz的证据吗？  
没有证据。这里非常安静。

2.高AC环路与SiP的每个电容器周围的探针。

- 有8MHz的证据吗？有，在每个电容器周围，而且SiP周围稍高

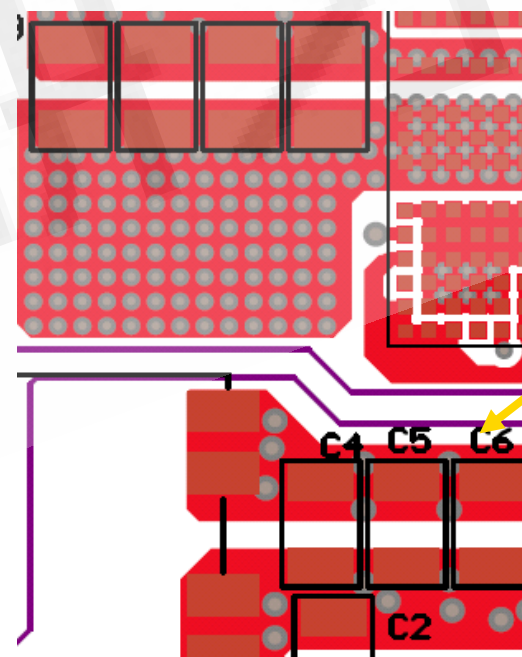
# EMI故障排除 — 修复布局

隔离问题区域和实施的修复



怀疑有耦合的区域

使用近场探针在这里探测到了8MHz



修正实施



# 鸣谢

## ■ 以下材料用于本演示的参考：

- 《设计控制传导发射》，作者：John C.Fluke（这是一本非常不错的书，强烈推荐）
- 《使用SPICE仿真器预测差分传导EMI》， Christopher Basso， 1996年4月12日
- 《执行EMI合规性测量》安捷伦技术应用手册
- CISPR 22， 第四版

谢谢大家！

有问题吗？

电子研习社

本文包含的、Vicor 提供的信息仅供一般性参考之用。Vicor 不对本演示的不准确性、错误或遗漏承担任何责任。电源产品用户仍对与此类使用有关的设计、测试和工作安全保护负责。