

光隔离探头在功率半导体测试的一些误区

光隔离探头主要用于开关电源、逆变器、充电桩、变频器、电机驱动等由功率半导体组成的高压高频电路的测试，尤其是宽禁带半导体器件包括氮化镓、碳化硅器件组成的半/全桥电路的测试。

为什么这些领域要用到光隔离探头呢？



图：光隔离探头

这些领域有一个共同的特点就是高压摆率（ dv/dt ）。传统测试高压电路一般用高压差分探头来完成；但是高压差分探头的共模抑制比、隔离电压、信噪比、带宽及带宽平坦度、抗干扰能力等方面都明显不足。功率半导体器件一直在向高耐压、低导通电阻、低开关损耗方面发展；从最终电路性能方面来说，就是电压越来越高，开关导通和关断时间越来越短，通过电流越来越大。



图：功率半导体器件发展方向

高压差分探头基本无法胜任这样的测试工作，而光隔离探头的优异性能完全弥补了高压差分探头的短板。

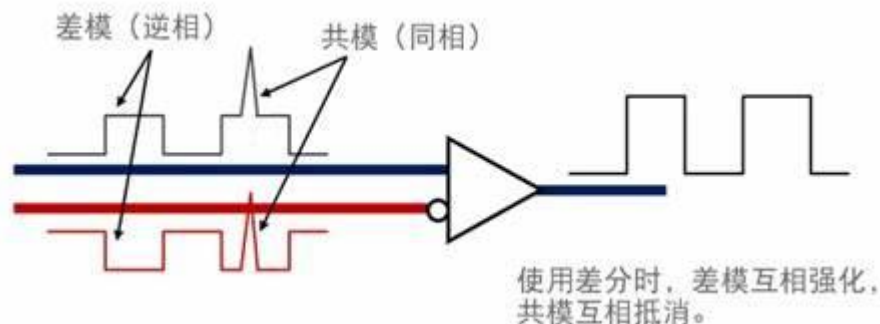
但是无论采用高压差分探头测试还是光隔离探头测试，有部分工程师在测试方面存在一些误区。

下面就这些误区做一个总结分享给大家探讨！

误区 1

差模电压与共模电压

有工程师以为，光隔离探头可以承受几万伏的共模电压，所以能测几万伏的差模电压。共模电压：共模电压是相对探头来说的；这个电压一般以大地为参考，探头的正负输入端同时被浮空于大地的电压就是共模电压，探头所标示的共模电压大小，就是探头的最大隔离电压。一般为了安全起见，探头的隔离电压必须大于被测电路的最高电压，以保护人身和设备的安全。**探头允许的共模电压是越大越好。差模电压：**差模电压就是探头需要测试的信号电压。



图：共模与差模

高压差分探头允许的最大差模输入电压就是差分探头的最大共模电压，一般从几百伏到几千伏，这和高压差分探头的电路原理有关。在有些场合，高压差分探头的共模电压和差模电压是相互矛盾的，工程师希望更大的共模电压来保证安全，同时希望高压差分探头在测试不同大小的差模信号时保持较高的信噪比，但是高压差分探头的硬件分压比是无法改变的，所以在差模信号幅度较低时信噪比也同步降低。光隔离探头由于是光电隔离的，共模电压可以高达几万伏，差模电压可以用不同的衰减器来适配，从毫伏级到几千伏，都可以有很高的信噪比。

总结：

1. 共模电压 $\neq$ 差模电压；具有很高的共模电压是光隔离探头的天生优势；
2. 通过更换不同衰减比的衰减器灵活适配差模电压，以保持更高的信噪比，这是探头厂商赋予光隔离探头的后天优势，与光隔离探头无关。

误区 2

信号没有高频

在分析功率器件构成的桥式电路时，部分工程师对信号的频率存在一定的误解：“没有高频啊，门极信号频率才几十 K 呢！”这种理解是没有基波和谐波的概念，把开关频率和信号频率混淆了。这里说的高频，是信号中的高频分量，不是开关频率。功率半导体器件在向高耐压、低导通电阻、低开关损耗方面发展，直接体现就是器件的 V_{ce} （或者 V_{ds} ）电压的 dv/dt 变得很大，尤其是碳化硅或者氮化镓器件，开关导通和关断过程的时间可以小到几个纳秒，这就导致由功率器件构成的桥式电路的中点有很高的高频能量，因此在测试宽禁带半导体上管的 V_{gs} 或者 V_{ge} 信号时，存在高频高压的共模干扰。这下我们知道了，这个信号中的高频，是信号中的高频分量，和开关频率没有关系；就算开关频率是 1Hz，信号中仍然会存在高频分量。既然信号中存在高频分量，就需要高带宽的探头才能胜任，否则信号中的高频振荡或者一些尖峰就会因探头的带宽所限制而看不见。在一家规模不大的功率半导体测试设备公司，笔者亲眼看到他们将差分探头的带宽限制

在 5MHz 用来测试 IGBT 的门极信号 V_{ge} ，因为他们没有考虑到信号中的高频分量，测出来示波器上的波形十分干净平滑。这样的测试结果让工程师表示非常满意，但是这样的测试设备会给 IGBT 生产线带来测试隐患，一些隐含的高频尖峰可能会被错过。在东莞松山湖的一家功率半导体测试实验室，工程师正在对氮化镓器件做测试验证，与上一个案例不同的是，他们怀疑高频异常信号的存在，但是无法看见他们。因为用高压差分探头无法测试上管，当他们用 500MHz 带宽的光隔离探头测试上管的 V_{gs} 时，发现了高达 580MHz 的震荡信号，这个震荡来自于板子寄生和器件的共同作用，要想更准确的观察与测量，需要带宽 1GHz 的探头才能胜任。

总结：

1. 信号频率不等于开关频率；
2. 信号中往往存在非常高的频率成分。对桥式电路来说，共模信号和功率器件的速度有关，差模信号和 PCB 布线与元件参数有关。

误区 3

高频共模抑制能力

每一个共模抑制比指标，一定是在特定频率下获得的。高压差分探头在低频段（100KHz 以下）的共模抑制能力尚可，在中高频段（1MHz 以上）的共模抑制能力就会很快变差。相对来说，光隔离探头的共模抑制能力会比高压差分探头好很多。但是不要陷入一个误区：只要是光隔离的探头，都有很高的共模抑制比。光隔离探头的原理决定了在直流及低频段天生具有很高的共模抑制比，只要是光纤隔离就可以很轻松实现直流 160dB 以上、低频 140dB 以上的目标。但是中高频的共模抑制能力不是光隔离探头天生具有的，是后天探头厂商赋予的，只要是后天赋予的，就一定存在高低优劣之分，这和探头厂商的技术能力相关。功率半导体电路，尤其是第三代半导体电路，都是高频叠加高压，需要探头在高频段（至少 200MHz 以上）的共模抑制比要很大。具体要多大呢，举个例子：假设测试氮化镓电路，共模信号电压是 500V， $dv/dt=250V/ns$ ，要抑制这样的共模干扰，如果 CMRR=60dB，探头会输出 500mV 的共模干扰叠加到差模信号上，对差模信号有明显的影响，如果 CMRR=80dB，探头会将 50mV 的共模干扰叠加到差模信号上，对差模信号的影响还是不可忽略，如果 CMRR=100dB，探头只会残留 5mV 的共模干扰，对差模信号来说完全可以忽略。（可以结合下图理解）



	共模信号电压	受到的共模干扰
CMRR=60dB	500V	500mV
CMRR=80dB	500V	50mV
CMRR=100dB	500V	5mV

探头有多高的带宽频率，就需要在这个带宽的最高频率情况下仍然有很高的共模抑制能力。例如 500MHz 带宽的探头，就需要在 500MHz 频率时，仍然有很高的共模抑制比。高带宽是为了能观察到高频差模信号，高频共模抑制能力是希望高频共模干扰能被完全抑制。

总结：

1. 为了确保测试结果的真实性，光隔离探头在 10MHz 至 1GHz 频段 CMRR 至少在 100dB 附近，低于这个值，光隔离探头就失去了最核心的价值——高频共模抑制能力；
2. 在直流及低频段具有很高的共模抑制比是光隔离探头天生的，在高频段具有很高的共模抑制比是探头厂商赋予的，不是天生的，需要谨慎选择。

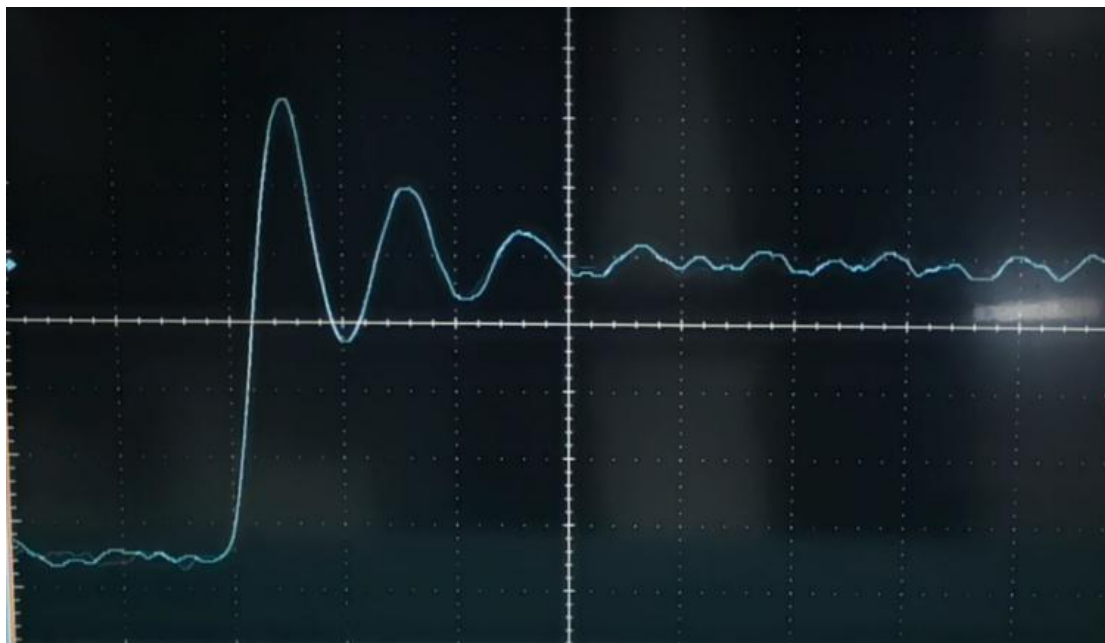
误区 4

带宽误区

前面说到有工程师在频率方面存在误解，因此对探头的带宽也存在误区，认为不需要更高带宽的探头和示波器。还有一种误区：信号有多高的频率，就选择多大带宽的探头和示波器。这个误区也会带来测试误导。前面的工程师用 500MHz 的探头观察到 580MHz 的震荡，能观察到不代表能测得准确。我们先来看看**带宽的定义**：带宽：也叫标称带宽或者-3dB 带宽。一个探头（或者示波器）测试信号时，当输出信号幅度衰减至-3dB（即输入幅度乘以 0.707）时的频率，就是这个探头的最大频率，一般将这个最大频率向下取整，定为这个探头的标称带宽。这个-3dB 衰减，就产生了 30% 的测量误差。所以，**标称带宽是不保证测试精度的**。什么情况下才能保证测试精度呢？有传说中的 5 倍法则、4 倍法则，说法不一，就是说取信号中的最高频率乘以 5 倍或者 4 倍来决定需要多大带宽的探头。在预算充足的情况下，倍数越高越好，如果预算不充足，选择能满足测试精度的就好。什么情况下能满足测试精度，和每一个探头的品质有关，有的探头，在 0.2 倍标



称带宽频率以后测试误差开始变大,有的探头在 0.5 倍标称带宽频率以上仍然具有较高的测试精度。为什么会这样呢? 看下面波形图:



图：探头快沿响应波形

这是一个探头快沿响应波形,这种大幅过冲和衰减震荡的波形,说明了探头的频响不好,过冲是为了让探头的另一个指标——上升时间更小,同时把高频的幅度提升,给带宽注水(例如将仅有 100MHz 的探头,用过冲手段注水到 200MHz),让探头电路产生这种过冲的方法来提升探头的最高带宽,这本身就是钻带宽定义的空子,欺负用户没有能力检测。这种探头的测量精度很差,带宽从 100MHz 注水到 200MHz 的探头,测量精度比 100MHz 带宽的探头还要差,因为持续的衰减震荡压榨了更多的高频精度。

总结:

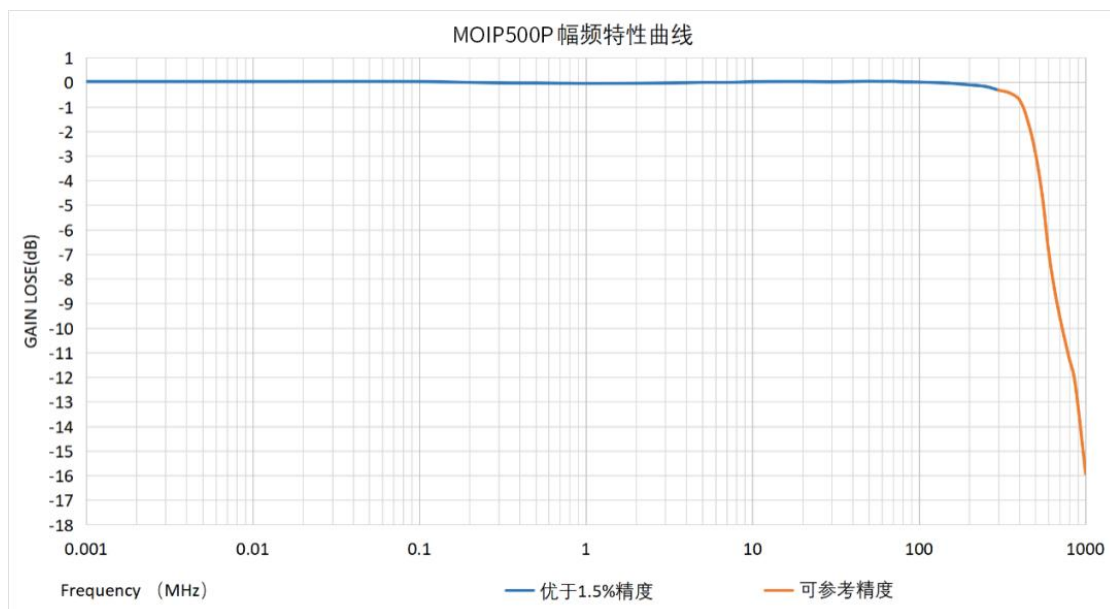
1. 探头的标称带宽是不保证测试精度的,具体到多少频率以下才有精度和探头品质有关;
2. 有些探头的带宽是有水分的,电压探头的水分可能会带宽翻倍。

误区 5 测试精度误区

无论是探头还是示波器,都会标示一个精度:DC 增益精度,许多工程师误认为这就是这台设备的测试精度。事实上这仅代表直流精度而已,不代表交流的精度。



下面来阐述一下测试精度问题。**DC 增益精度**：一般测试仪器会给出这个指标，就是测试直流信号时能保证的测试精度。作为光隔离探头来说，这个指标有用，但不是核心指标；谁会用光隔离探头来作为直流信号的主要测试手段呢，用万用表既准确又经济不香吗？探头在什么频率情况下才能保证测试精度，基本没有厂商提及这个指标，这给测试仪器市场带来了一定混乱。其实需要给探头或者示波器提出另一个指标：**有效精度带宽**，这个指标由麦科信公司提出并应用到旗下光隔离探头产品，指引工程师知道什么情况下测试的结果可以信赖。**有效精度带宽**：在给定测试精度指标的情况下，探头保证该测试精度的最大带宽。例如麦科信型号为 MOIP500P 的光隔离探头，标称带宽为 500MHz，有效精度带宽为 300MHz，说明这个探头的最大带宽是 500MHz，从 DC 至 300MHz 可以保证 1.5% 的测试精度，这能够让工程师放心采用这些测试结果。与有效精度带宽相对应的，还有一个指标：**带宽增益精度**。带宽增益精度：在有效精度带宽范围内探头的测试精度。例如上面的型号的探头，带宽增益精度是 1.5%。



图：MOIP500P 实测幅频特性曲线

一般工程师有没有手段来检验自己手中探头的有效精度带宽呢？一般有以下两个办法：**办法 1**：用能产生高频正弦波的标准信号源，从低频到高频输入给探头，看探头输出幅度的变化，并与标准值进行比较计算误差。**办法 2**：自己没有条件的情况下，找正规检测机构测试探头的幅频特性数据，但是这会产生一定检测费用（在数据不理想的情况下可以让探头厂商承担费用，并作为退货依据）。

总结：

1. 打个确切的比方，探头就像房子，带宽是建筑面积，有效精度带宽是使用面积，真正有用的是使用面积。关注探头的有效精度带宽，做到测试精度心中有数。

2. 用标准信号源验证测试设备的各项指标，这比猜想和设备间相互对比更科学。

