

## 关于高压测试中电压“测不准”问题的讨论

汪进进 美国力科公司深圳代表处

在拜访电源客户时，我们常常遇到这样一个现象：测试高压时不同品牌的示波器测试的结果差别很大。有一次对比测试中我们发现测试大约 450V 的 MOSFET 的  $V_{ds}$  电压，三台示波器的最大差别有 50V 左右；同一品牌不同型号的示波器差别也很大；同样的示波器不同探头测量结果有时差别也很大。对于电源客户而言，MOSFET 的电压应力测试是一项关键指标，决定了电路的调试，电源的使用寿命，MOSFET 器件的选型等。客户一提起这个问题，我总说，我理解，我很理解，因为我在做电源工程师时也遇到同样的问题，也为这问题苦恼过。我记得在写测试报告时要标明是用什么型号的示波器和什么序列号的探头测试出来的结果。但我想很多电源工程师并不理解这个问题的理论根源，常常追问我，到底哪个结果可信？甚至有些很较真的工程师用标准的 AC Source 来作为信号源来“计量”哪一台示波器是准确的，但往往是很失望，没有一台示波器的结果能“相信”，有的有效值“测不准”，有的幅值“测不准”，有的峰峰值“测不准”，因为有效值和幅值之间存在 2 倍根号 2 的关系，没有示波器测试出来的结果符合这个关系式，甚至有的客户和我争论一定是峰峰值满足 2 倍根号 2 关系才对，幅值是不对的。因此，我早觉得是有写一点东西来解释这个问题的必要了。

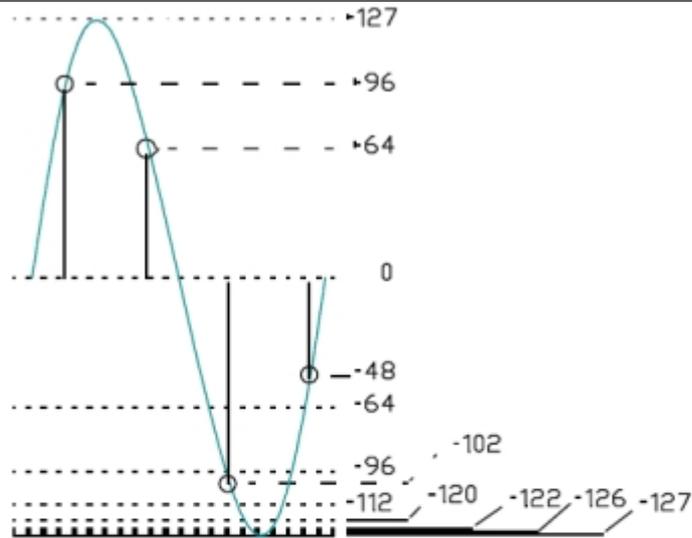
高压“测不准”的原因其实很简单，还是我常强调的四个因素：第一是示波器的量化误差问题，第二是示波器的幅频特性曲线的平坦度问题；第三是环境噪声的干扰问题，第四是探头的共模抑制比和快恢复特性问题。

### 1, 量化误差的概念

(在之前的多篇文章中我们都谈到了量化误差对示波器测量的影响。为保持单独这篇文章的完整性，我们还是重复一下这相关的解释。)

我们都知道，示波器的 A/D 只有 8 位，也就是说对于任何一个电压值都只有 256 个 0 和 1 来重组，如果包括 +/- 符号位，示波器的数字量程是 -128—+127。图一很清楚地显示了这种数字化采样的原理，示波器的屏幕最顶部代表的是 +127，中间代表的是 0，最底部代表的是 -128。这种原理就产生了使用示波器的第一原则：最小化量化误差。这个原则告诉了我们使用示波器的一个常识，为获得最接近于真实值的电压值，应使垂直分辨率尽可能地小，使显示的波形尽量占满示波器的屏幕。

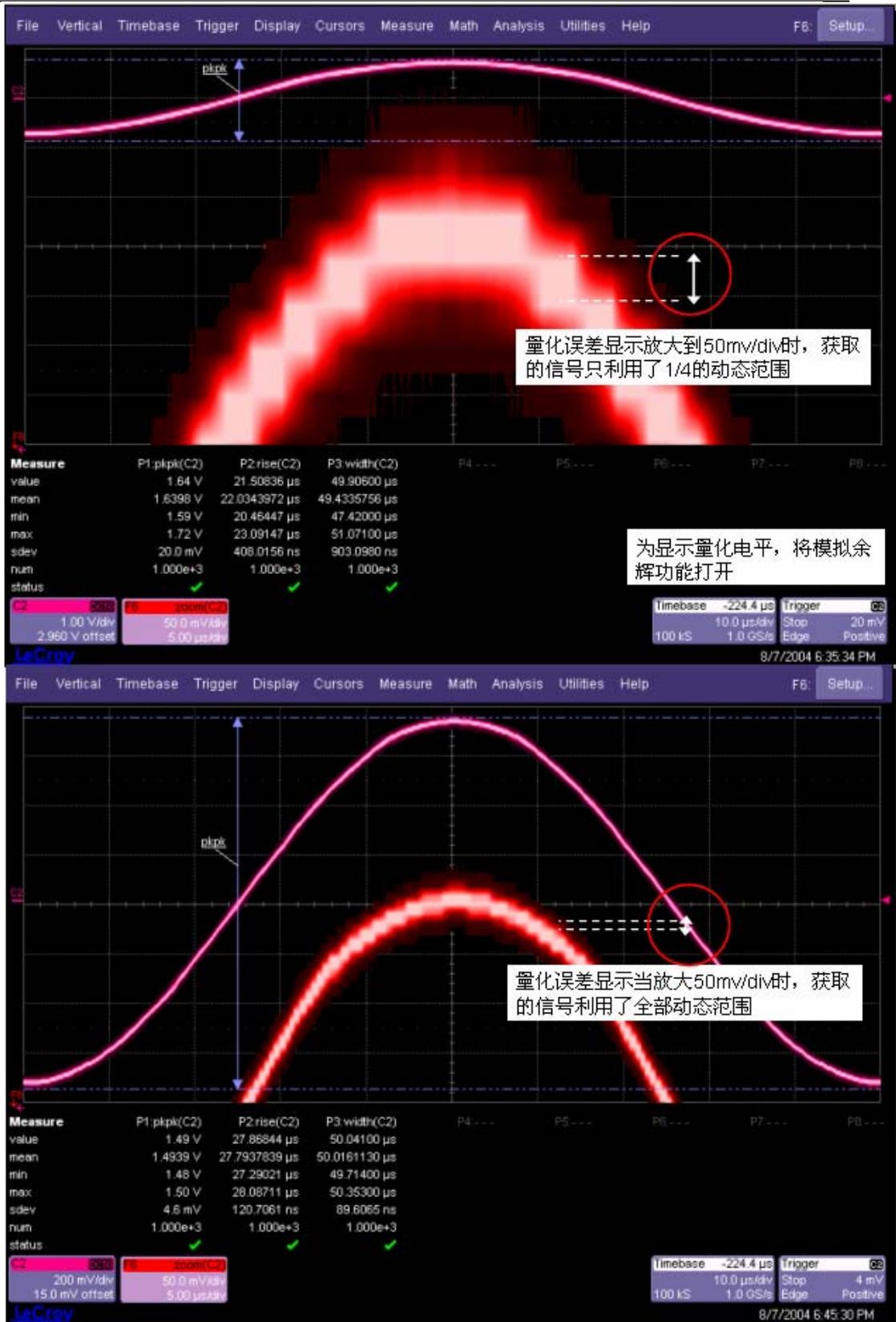
图二分别表示在 1V/div 和 200mV/div 的时候测试相同的信号的效果。在 1V/div 的时候，示波器的最小量化误差是  $(1V \times 8) / 256 = 31.25mV$ ，这意味着小于 31.25mV 的信号是无法准确测量出来的。而对于高压测量，假设量程是 100V/div，示波器的量化误差是  $800V / 256 = 3.125V$ ，这意味着小于 3.125V 的信号是无法准确测量出来的。



Decimal	Signed Binary
+127	11111111
+1	10000001
0	10000000
-1	01111111
-128	00000000

图一 量化误差原理解释

我常举下面的更令人印象深刻的例子来说明量化误差：将探头的地和信号针直接相连悬在空中，比较量程为 20mV/div 和 100V/div 时的 pk-pk 值，其差异是多大？几十伏的差异！！您现在就可以做这个实验。这表示在 100V/div 时测试出来的 20V 的信号，实际上只有不到 20mV！ 所以对于测量 800V 的高压，20V 的误差是非常非常正常的！ 50V 也是非常正常的！



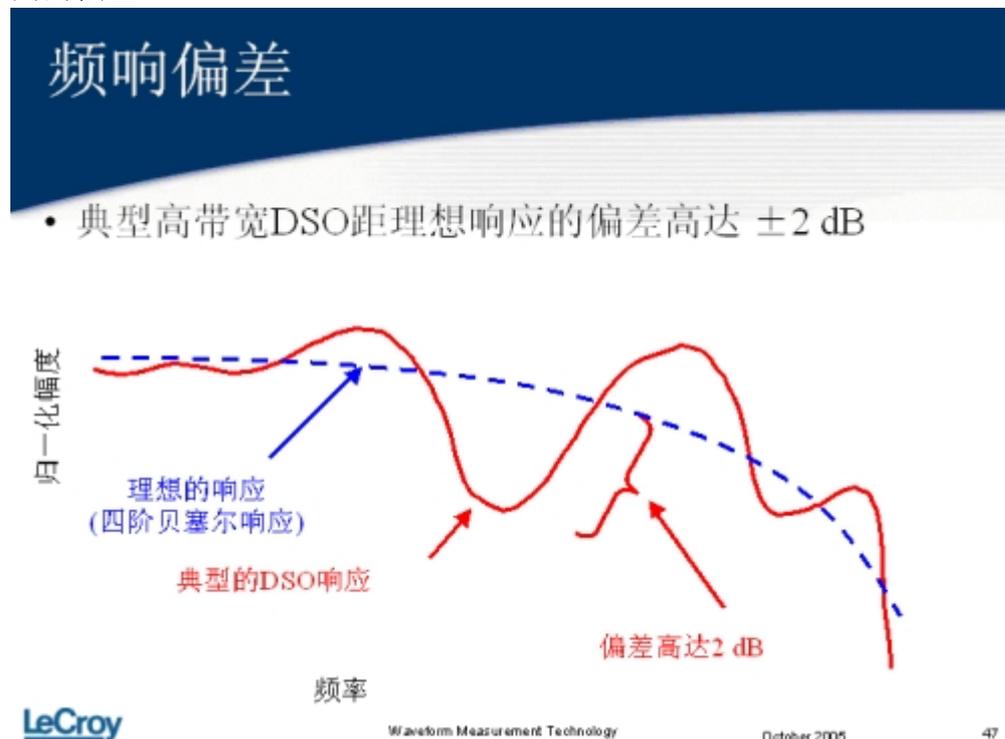
图二 在不同量程下的测试效果

## 2, 幅频特性曲线平坦度问题

就示波器的行业标准而言, 示波器幅频曲线距离理想响应的偏差允许达到 $\pm 2\text{dB}$ , 这对有些精确度要求很高的测量似乎是很不能接受的误差范围。因此, 示波器并没有在测量界定义为计量的工具, 它只能说是调试的工具或测试的工具。

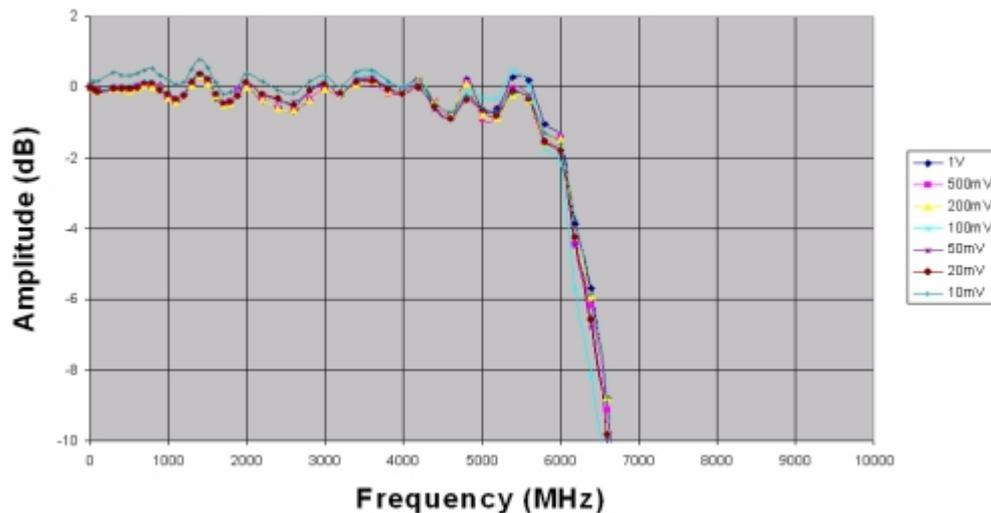
此外, 不同型号的示波器, 不同品牌的示波器, 其前端放大器的响应曲线也是有差别的, 有的是高斯响应, 有的是矩形响应, 有的是四阶贝塞尔响应。对于输入相同频率的信号, 不同示波器的垂直参数的测量结果肯定是不一致的, 不同垂直通道设置下的测量结果也应是不一致的。

我们从仪器校准专业了解到, 示波器在校准时, 一般会把平坦度校准到 $\pm 1.5\%$ 以内, 这是比较严格的标准。这意味着, 对于理想中的  $1\text{V}$  的正弦信号, 测试的结果偏差  $15\text{mV}$  是很正常的。图三表示理想响应和实际的示波器响应之间的偏差。



图三 理想的响应和典型响应曲线之间的偏差

图四显示的是我们  $6\text{GHz}$  的幅频特性曲线。可以看出其最大偏差远小于 $\pm 2\text{dB}$ 。示波器使用一段时间后平坦度会有些改变需要送校准机构进行校准。但通常很多第三方机构只能判断出幅频曲线是否合格, 但并不能将平坦度校准到厂家能校准到的水平。因此, 现在常有些客户要求示波器原厂提供校准服务。如果比较两个不同品牌相同带宽的幅频特性, 对于同一个频率点其幅值不可能是相等的。



图四 实际的幅频特性曲线图

### 3, 环境噪声的干扰问题

干扰的传播有两个来源，一个是传导，一个是辐射。前者指干扰沿着导线介质来传播，后者是指通过空中的电磁场的耦合。这两个因素都会影响测试结果。

地环路常是传导的介质。在我做电源研发的时候,我记得大家流行的一句口头禅是,接地和电流采样是永恒的话题。电流采样的难点也是和接地有关的,因为通过小电阻来采样电流后得到的电压非常小,在强电环境中非常容易受到干扰,特别是地带来的干扰给控制环路的设计带来难题。“地”的问题是更复杂的话题,我的功底很难讲清楚,我只是讲一些这方面的“故事”吧。

专业的工业厂房的“大地”有很专业的接地措施。之前听公司的 EMC 专家讲起公司的厂房是如何做地的过程,让我当时深刻体会到“专业主义”真是无处不在。在 google 中搜索“接地公司”会发现有很多这样的公司。记得我第一次对“地”有深刻印象是和导师一起去厂方做实验,导师拿着一根线跑了厂房外面十几米的地方将那根线埋到满是泥的池塘里。因为当时觉得那个实验环境下厂房的地干扰太大。我常把“大地”比如成波澜不惊的大海,而每一个和大地连接的电子设备的地就如流向这大海的无数条河流。每个电子设备在工作的时候就会使河流入海口的地方的海水变“混浊”,如果在这附近有另外一个电子设备也在工作,这条河流变混浊的海水会影响到另外一个河流,这时候另外一个设备甚至可能不能正常工作。这种相互混浊的过程带来了一门科学,就是 EMC。我刚入职的时候听公司的大佬讲到,电源设计的最高境界是 EMC 设计和结构设计,当时没有很以为然,后来的研发实践和现在从事示波器的销售过程中,这种感受一天比一天强烈。河流的相互混浊即每个电子设备或实验单板的工作地相互干扰的现象比比皆是。我之前做 3000W 的 AC-DC 电源项目的时候,我犹记得每次做实验的时候,当我要将负载加到 50A 的电流的都会叫停同一个实验室中其他的同事停止工作,否则我的示波器上的波形非常糟糕,根本无法看清。功率越大,对地的干扰越大。记得当时做一个三相单极 PFC 的项目,为了能使 THD 在半载以上小于 5%,我们只有每天早晨八点之前到公司做实验才能满足这个指标。(大功率的 AC Source 很贵,很难借到)

以上这些比方和故事会使我们深刻认识到地之间的相互干扰是必须要严肃对待的问题。在示波器的测量中，我们强调一定要三相供电，将示波器的地接到“干净的”地上。但实际的测量环境中，干净的地很难找到，这时候测量结果就要考虑到地环路的影响。我看到很多客户将示波器的按地插头去掉，用两相电源线给示波器供电，试图通过这种方法来避免环境地的干扰以及解决悬浮的高压测试问题。这种浮地的方法是仪器厂家强烈反对的做法，它可能会导致示波器损坏，DUT 损坏，还有可能带来人身安全问题，而且更重要的是，会导致测试波形的严重失真。以示波器的机壳作为参考点的测量能准确吗？一定要让示波器的地牢固地接到干净的地上，而地不干净的时候要想办法找到干净的地接到示波器的地。地是探头取样的参考点，必须是干净的才能得到最准确的测量结果。

关于辐射，每个人都会有强烈感受。这是一个处处充满辐射的世界。辐射对测量的影响的故事也很多很多。

对于一个 48V/50A 的通信电源，业界要求输出电压的纹波峰峰值是 100mV 以内，这个指标是指将电源盖上机壳后的指标。盖机壳是最后做的事情，做一个项目先设计出单板，连机壳是什么样都不知道。这时候我们在测试中需要将示波器的带宽限制为 20M。在不盖机壳测试为 200mV 的时候，老板说“盖上盖子就满足了，不用再折腾了。”这就是经验，因为老板之前有比较过揭开盖子和盖上盖子的差别！EMC 似乎是关于经验的学问。

单端探头的线差不多都有一米长，我们将这些线悬在空中和将这线尽可能地缩短然后用手握住，测试结果会有多大差别？这又是经验。在将负载增加的过程中，为了能从示波器中看出信号的端倪，我不得不不断地折腾探头的线，一会松开线看看波形，一会又将线裹在一起握住看看波形。这种痛苦对于弱电的研发是感受没有那么强烈的。

有时候有些工程师为了省事，同时用多个通道时，只将一个探头的地线接上，这无疑为对测量结果影响很大。探头的地线越短越好，地线和信号线之间的环路面积越大，辐射带来的影响越大。这在霍华德那本经典书中一开始就有谈到。

有时候探头的地线被磨损了，测试的波形看起来是一条直流信号上有很多细小的毛刺。有一次我查看这种毛刺的来源，找了半天才发现这根探头的地线是工程师自己做的。没有很好屏蔽效果的地线也会极大地增加辐射的干扰，在高压测试中很轻松地带来 100V 以上的误差。

在用高压差分探头测试时，需要将两条线绞在一起而不要让它们自由地散开。这是常识，但很多工程师都没有意识到。

有一次，一个工程师投诉我说，用我们两个相同型号的探头测试同一个被测点，交换通道后幅值差别很大。后来我查了半天，发现本质原因不是交换通道，而是和两个探头的线的摆法有关。两根线的位置不一样测试的结果就不一样。

所以，我们在看到一个现象的时候总要去反复做一些交叉实验，对比测试后才能找出现象后面的原因，最终解决问题或得出结论。

传导和辐射，我们在测试的时候总要考虑这两点对测试结果的影响。

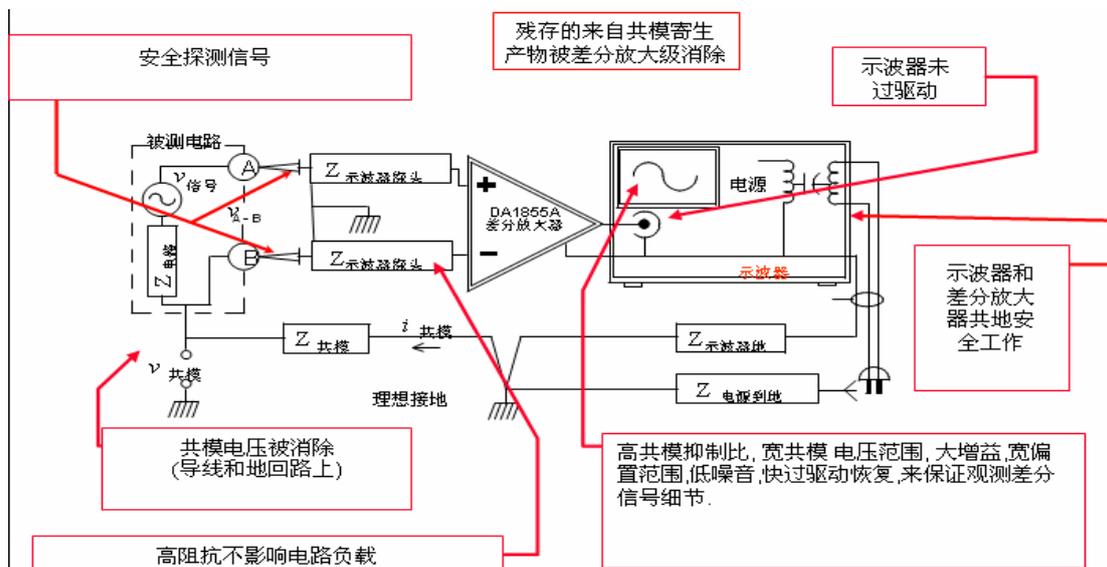
#### 4. 探头的共模抑制比和快恢复特性问题

我们关注的信号总是两个信号相减的结果，对于单端信号，是被测点的电位和地相减，对差分信号，是两个相对地的差分信号之减。我们希望示波器测试到的信号是探头的减法效应之后没有引进对地的共模噪音。这在实际中是不可能

的。因此，探头的共模抑制比越大，测试出来的结果越准确。不同的探头共模抑制比不一样。单端探头的共模抑制比很低，只有几千分之一，而普通的高压差分探头，如力科的 ADP305, T 公司的 P52XX 等共模抑制比为一万分之一。这在高压测试中是不够的。如在测试全桥或半桥电路的上半桥  $V_{ds}$  电压时，MOSFET 关断时的  $V_{ds}$  电压为 400V 以上，在 MOSFET 导通时的  $V_{ds}$  电压只有 100mV，我们需要在示波器中清晰地看到 100mV，这意味着示波器和探头构成的测试系统能够从 400V 电压中拾取 100mV 的小信号，这需要探头具有 10 万分之一的共模抑制比。在这个世界上，只有力科的差分放大器 DA1855A 具有这样高的共模抑制比。

此外，还有很重要的一点是，对于  $V_{ds}$  电压测试，由于从 400V 电压跳变到 100mV 的电压是瞬间的突变，如果探头没有很好的快过驱动恢复能力，会导致示波器过驱动，测试出来的结果也是不准确的。MOSFET 导通时的 100mV 的电压测试出来的结果可能为负的十几伏。大家可以立即去确认下这一点：在 50V/div 的 量程下看到导通时的波形是一条零线，但将量程调节到 100mV/div 的时候，就看到零线变成了负线，有的时候还会看到这负线不是恒定的，而是上下跳动的。在这个世界上，只有力科的差分放大器 DA1855A 提供了很好的过驱动恢复能力，使得能准确测试出 MOSFET 在导通时的低电压，从而测试出来的  $V_{ds}$  电压值才是最准确的。这就好比一个人骑着一辆自行车从 60 度的陡坡冲下来，如果这自行车没有很好的刹车系统，它是无法停留在它本来应停留的位置，总会冲得更远。如果您曾骑车下坡撞到了墙上就会对此印象深刻。

图五所示为差分放大器 DA1855A 的工作原理和外观图。



图五 具有快过驱动恢复特性和高共模抑制比的 DA1855A

---

综上所述，我们知道，测量是科学，也是一门艺术。既需要理论的指导，也需要实践经验的总结。总结了经验之后，我们需要对测试规范做更细致的描述，对于有些测试指标应重新审视一下是否合理，对于有些测试指标要详细定义测试的环境和示波器的设置等。对于电源的  $V_{ds}$  电压，超过 450 伏就超标了，这个问题困扰了太多的工程师了。我们该如何重新定义这个指标？这个问题我还没有给出答案，因为我的答案您一定不会满意——我的答案是需要用 DA1855A 来测试，但问题是 DA1855A 比 ADP305 要贵得多。还是每个公司去定义自己的司标吧 😊