



AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

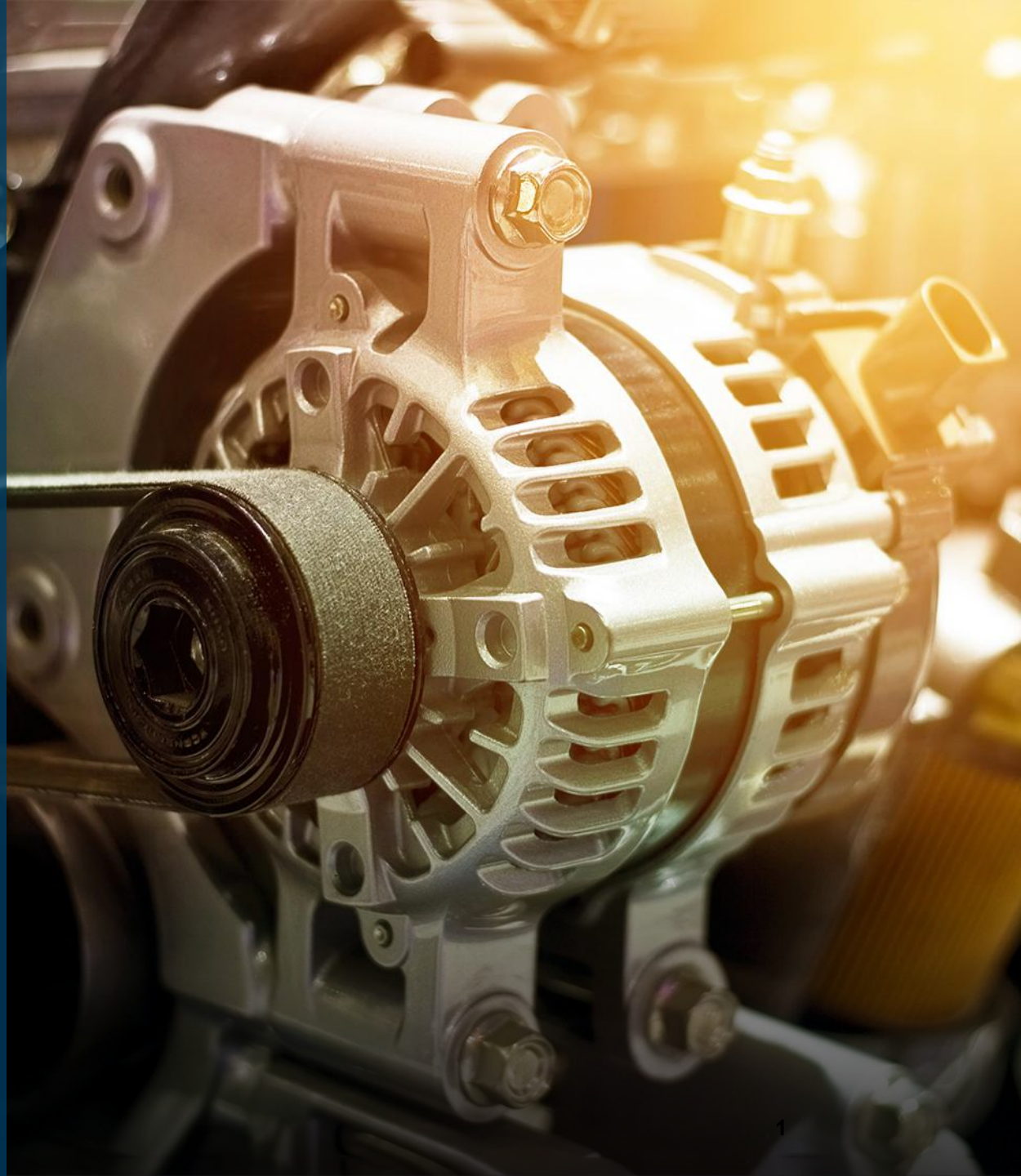
如何测量栅极驱动波形

RYAN SCHNELL

应用工程师

iCoupler®隔离式栅极驱动器

2017/5/25



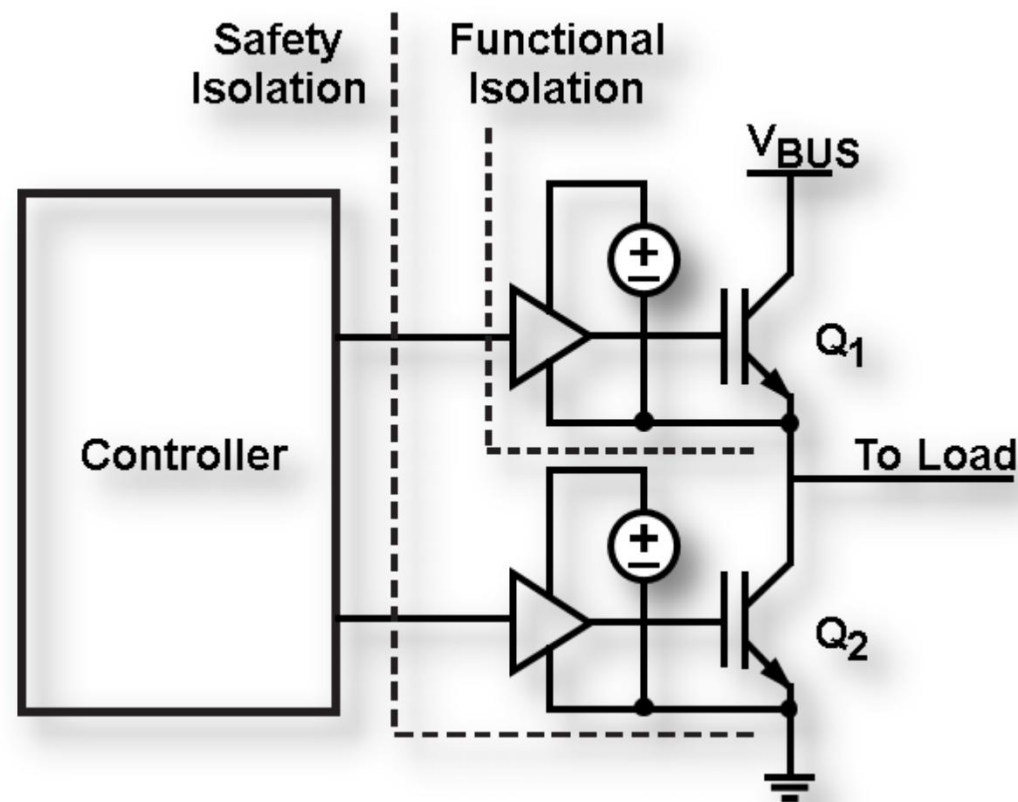
议题

- 简介
- 栅极驱动器重要指标
- 探针的选择和使用
- 测量栅极电压
- 测量栅极电流
- 量化时序指标
- 噪声鲁棒性测量

简介

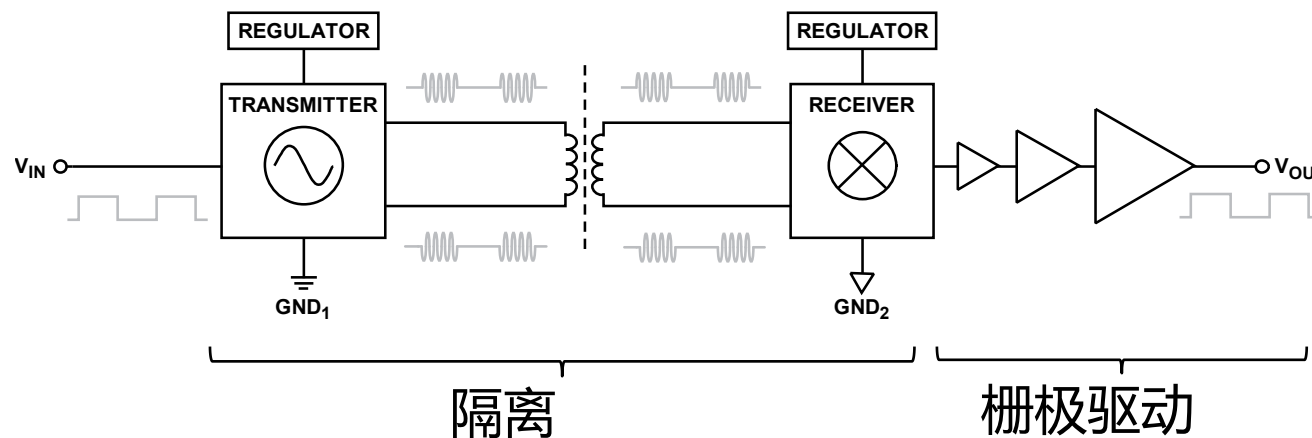
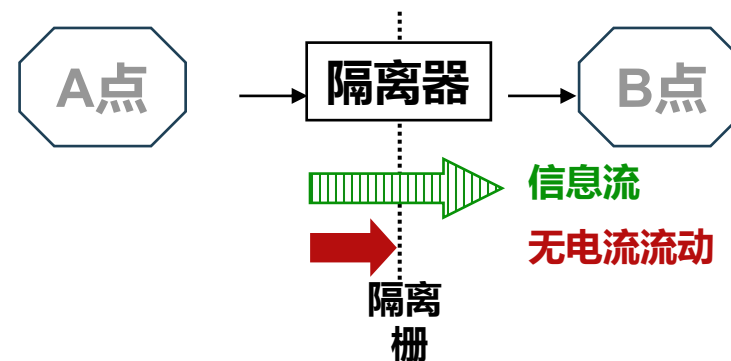
栅极驱动器

- ▶ 栅极驱动器能提供操作较大负载（由功率开关提供）所需的驱动强度
- ▶ 标准GPIO引脚驱动功率
MOSFET/IGBT会导致上升时间慢，
并需要大量功耗
- ▶ 隔离式栅极驱动器可提供功能和/或安全隔离栅
- ▶ 栅极驱动器还能集成保护功能，使整个系统设计更轻松



隔离式与非隔离式栅极驱动器

- ▶ 相比于GPIO引脚，非隔离式栅极驱动器能提供额外的驱动强度。
- ▶ 隔离式栅极驱动器还能将输入信号地与输出信号地解耦。
 - 支持高端驱动
 - 提供电流栅
- ▶ 非隔离式栅极驱动器可利用其他元件来增强隔离，但代价是时序延迟会增加
- ▶ 本研讨会谈到的测量技术同时适用于隔离式和非隔离式栅极驱动器。



功能隔离与安全隔离

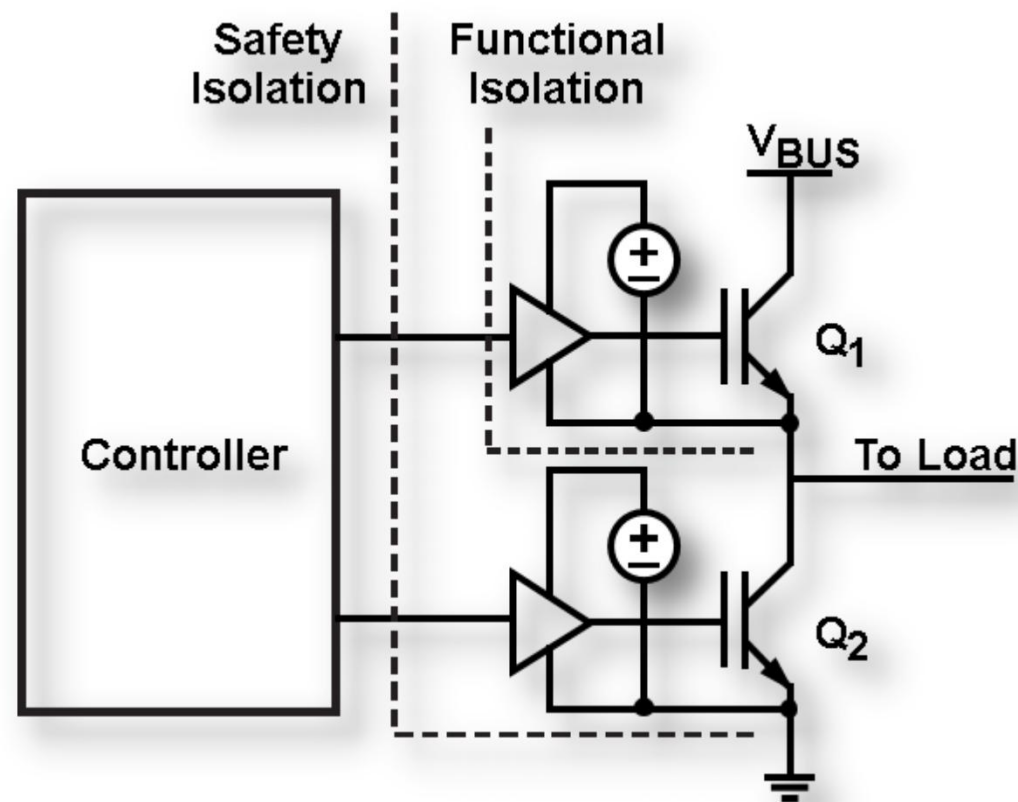
- ▶ 功能隔离
 - 工作要求
- ▶ 安全隔离
 - 认证要求

考虑下例：

$V_{bus} = 400\text{ V}$

$Q1\ V_{gate} = \pm 20\text{ V}$ (绝对最大值)

控制器接地



功能隔离允许高端随半桥电压浮动

安全隔离为电流隔离栅，防止400 V电压危及人体

栅极驱动器重要指标

栅极驱动器重要指标

理想栅极驱动器：

- 提供电平转换
 - 示例：CMOS至栅极电压电平
- 完美的时序
- 可控的栅极上升/下降时间
- 鲁棒，不受任何噪声源影响
- 无辐射发射
- 无热约束

栅极驱动器重要指标

理想栅极驱动器：

- 提供电平转换
 - 示例：CMOS至栅极电压电平
- 完美的时序
- 可控的栅极上升/下降时间
- 鲁棒，不受任何噪声源影响
- 无辐射发射
- 无热约束

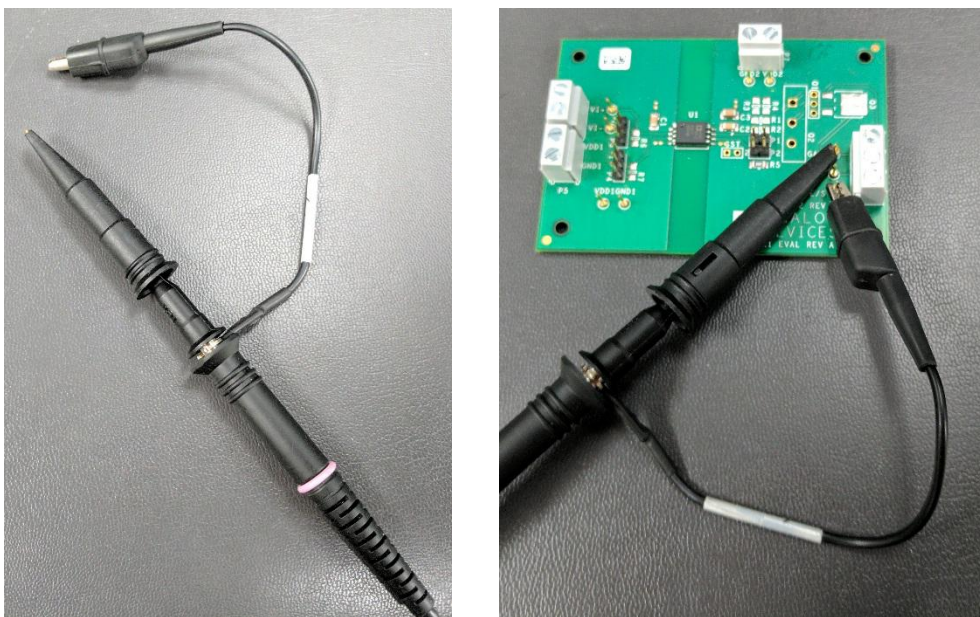
实际栅极驱动器：

- 提供电平转换
- 有传播延迟
 - 偏斜、PWD、抖动
- 可控的栅极上升/下降时间
 - 外部串联电阻
- 噪声源可能影响
 - CMTI
 - 输入毛刺
 - RF
- 有辐射发射
- 功耗是一个问题

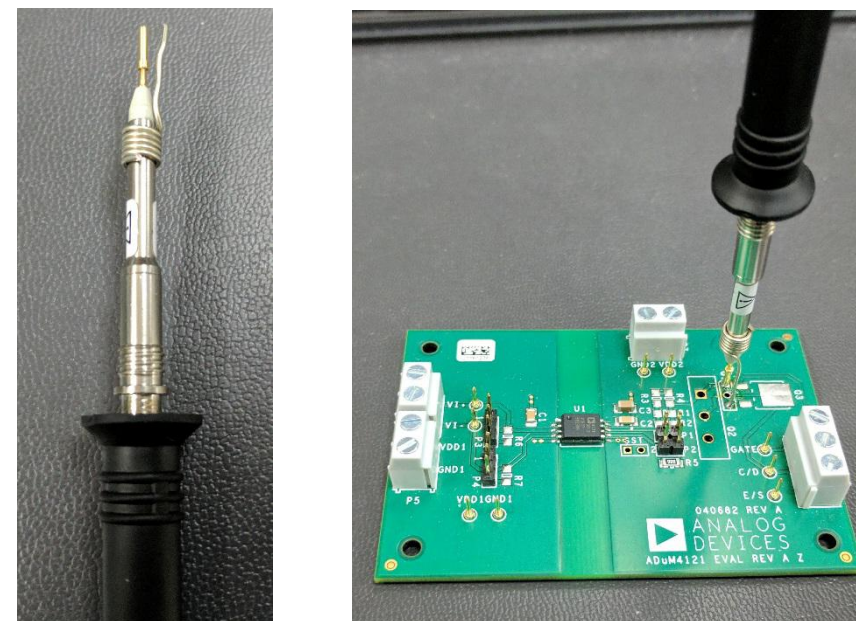
探针的选择和使用

探针类型/探针设置

- ▶ 单端探针提供的波形通常是最干净的
 - 某些信号需要差分探针
- ▶ 为实现最佳测量，必须缩小测量环路
- ▶ 可能时使用“猪尾”引线



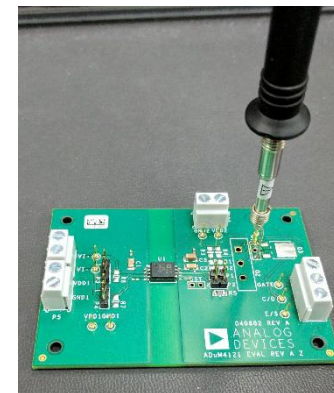
“鼠尾”引线



“猪尾”引线

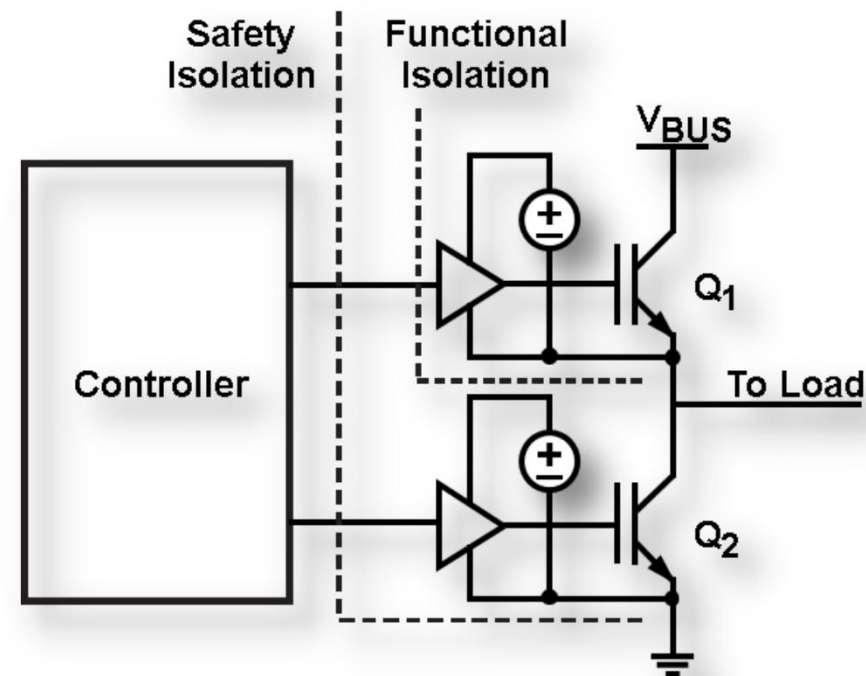
制作“猪尾”引线

- ▶ 可使用商用探针针尖护罩
- ▶ 您可以轻松地自行制作引线：
- ▶ 本例使用20 AWG镀锡裸铜线
- ▶ 针尖可穿过电路板上的通孔或接入插座



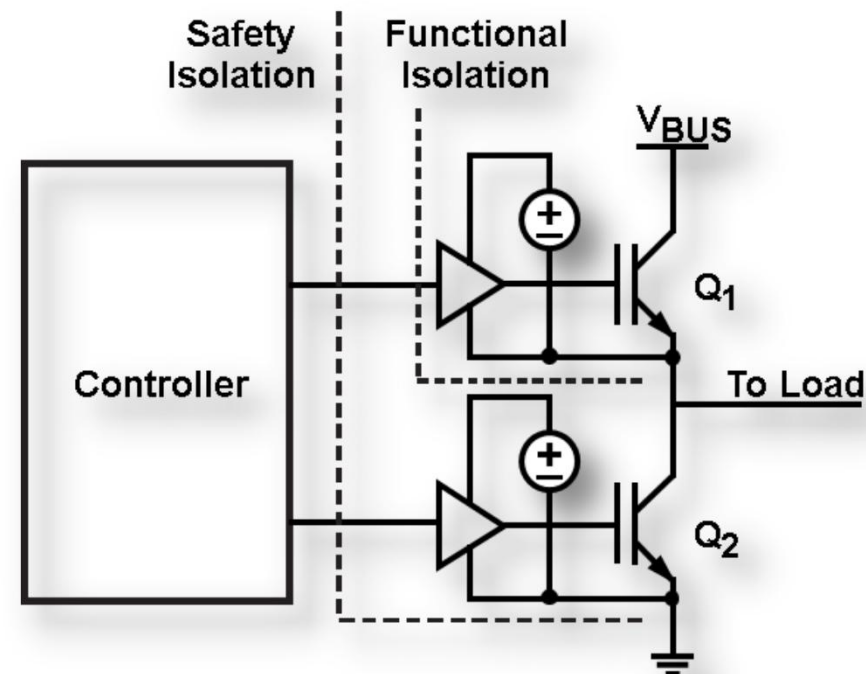
单端探针与差分探针

- ▶ 差分探针容许共模失调
- ▶ 单端探针通常接地。
 - 小心！将探针的接地引线连接到非大地接地连接会使该连接通过示波器接地
 - 这可能会损坏电路和/或示波器
- ▶ 探针重要指标：
 - 共模范围
 - 差分范围
- ▶ 如果系统接地，单端探针无法直接测量高端栅极驱动波形。



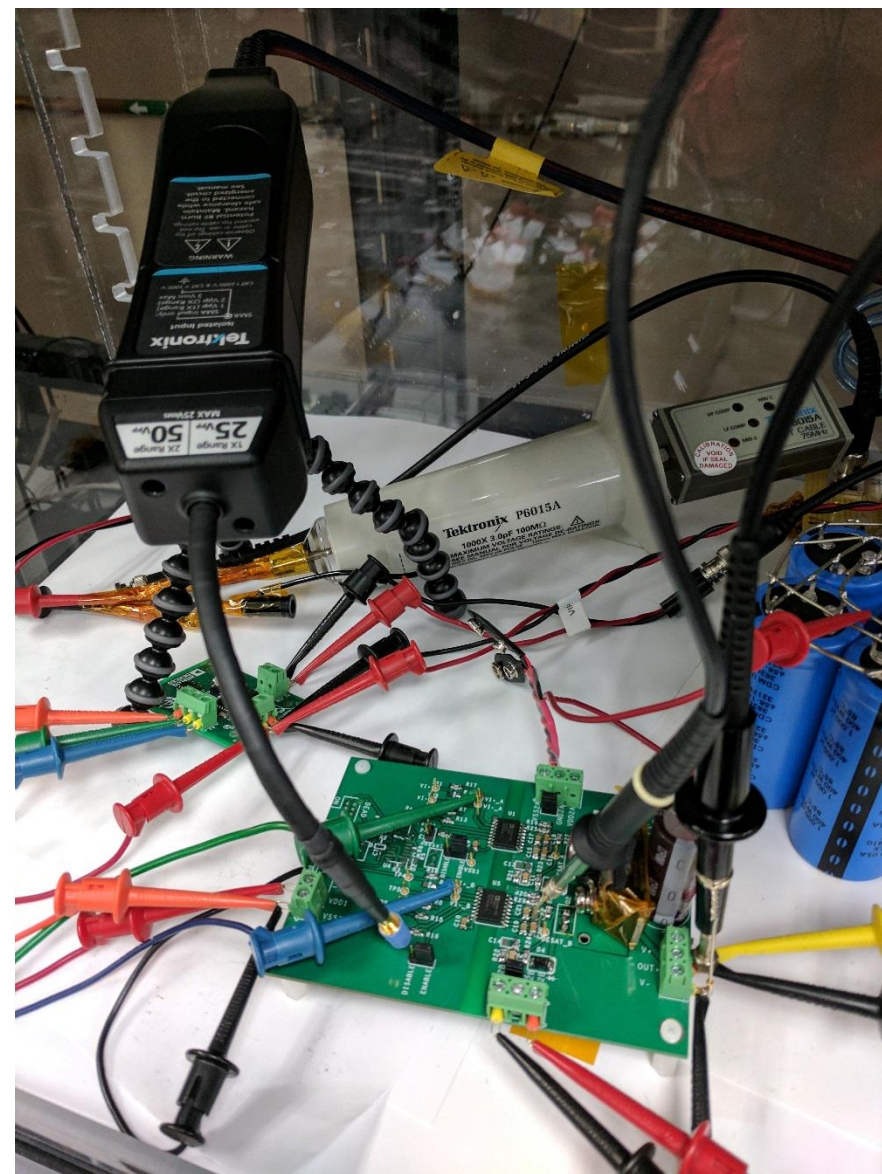
单端高端栅极测量考虑事项

- ▶ 单端探针地通过示波器连接
- ▶ 示波器通常接地
 - 存在电池供电的浮空设备，但也需要特别小心
- ▶ 考虑下例：
 - $<250\text{ Vrms}$ $1\text{ M}\Omega$ 探针
 - $V_{\text{bus}} = 200\text{ VDC}$
 - $V_{\text{gate}} = 0\text{ 至 }15\text{ V}$
- ▶ 不能把地放在高端源极/发射极上
- ▶ 可使用两个探针和MATH功能
 - 相位问题
- ▶ 可测量低端并“信任”高端



高端差分探针考虑事项

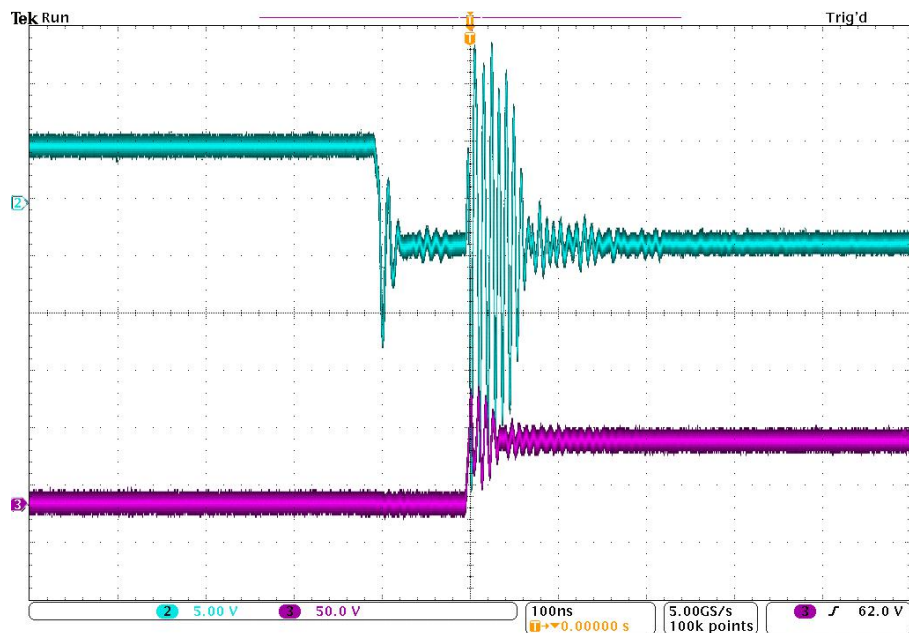
- ▶ 存在高压高共模差分探针
- ▶ 通常是测量高端波形的最佳选择
- ▶ 小心不要超过差分限值
- ▶ 所示为Tektronix TIVM1差分探针
- ▶ 同时显示了P6015A HV单端探针



测量栅极电压

“鼠尾”与“猪尾”引线 – ADuM4121 GaN半桥示例

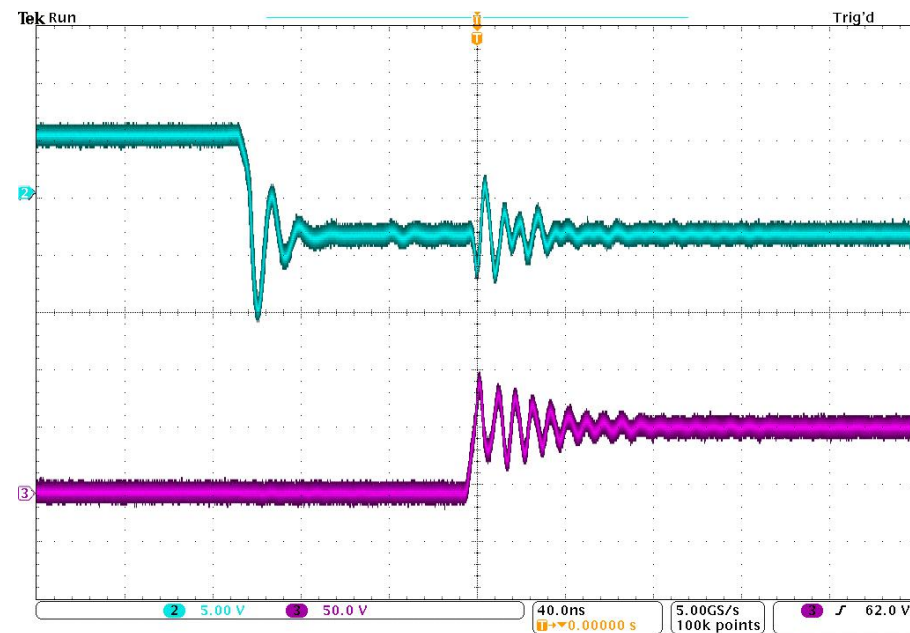
- ▶ 小测量环路
 - 更干净的测量
 - 更低噪声注入



“鼠尾” 引线

V_{gs}

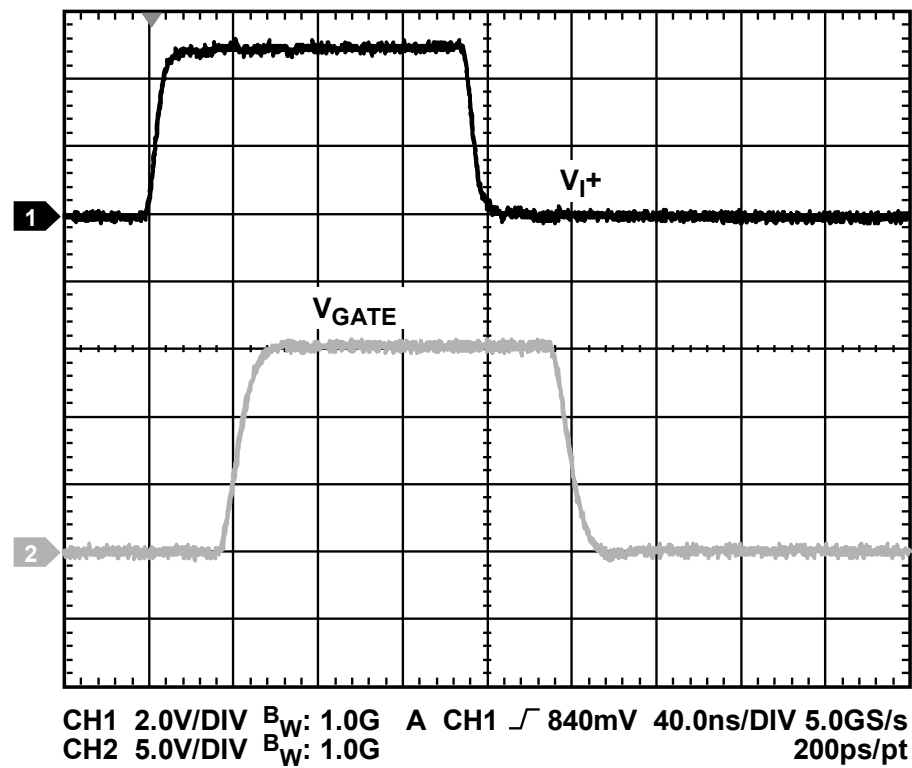
V_{ds}



“猪尾” 引线

数据手册数值与应用

- ▶ 数据手册中的栅极驱动波形常常很漂亮。
 - 当测量实际应用中的波形时，很少有那么干净
- ▶ 原因包括：
 - 负载/阻尼
 - 探针类型
 - 探针设置
 - 环境噪声水平/功率水平

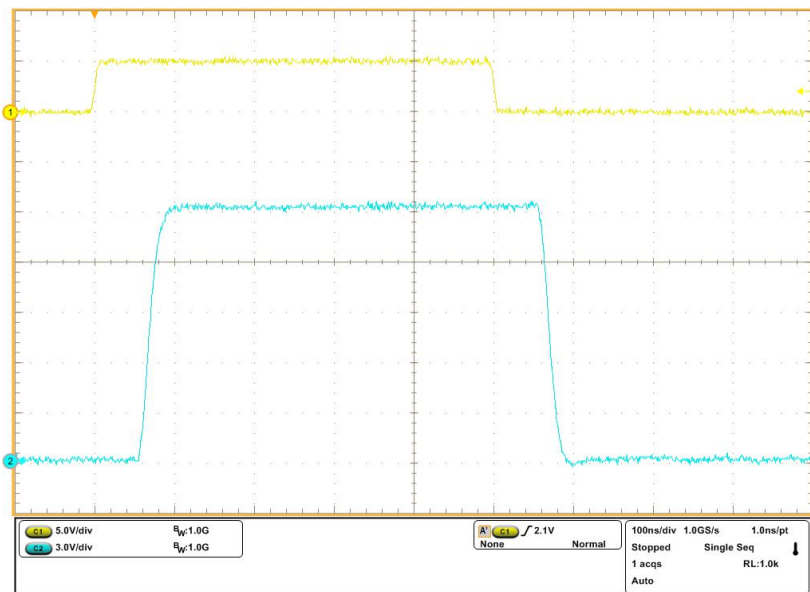
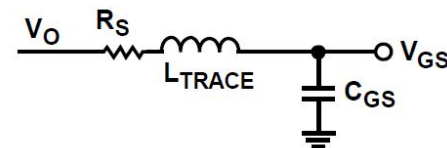


ADuM4121数据手册波形

外部串联栅极电阻选型 – 阻尼

- ▶ 栅极驱动建模为一个简单的RLC电路
- ▶ 目标Q小于1
- ▶ 难以完成，因为 L_{TRACE} 常常是未知量
- ▶ 更高 $R_s = R_g + R_{dson}$ = 更高阻尼
- ▶ 良好的布局布线可降低所需的 R_s 值（像ADuM4135一样分离输出会有帮助）

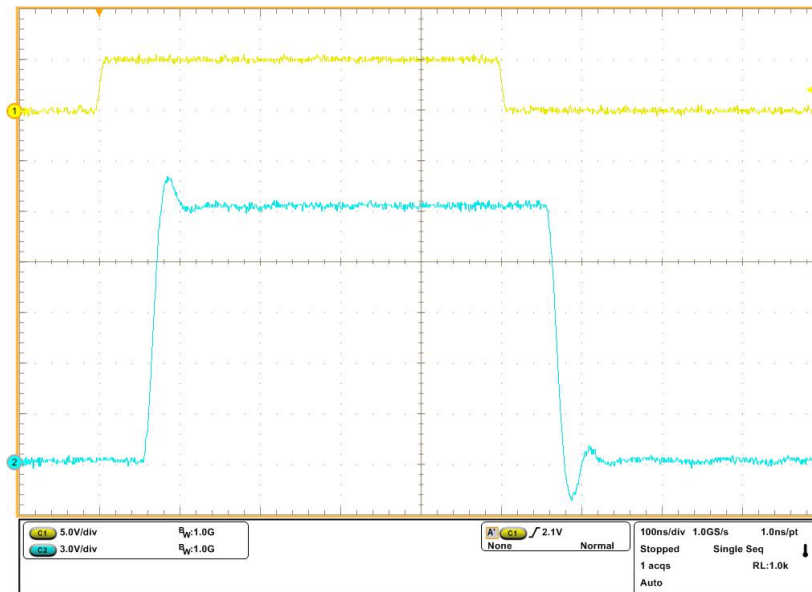
$$Q = \frac{1}{(R_G + R_{DS(on)})} \times \sqrt{\frac{L_{TRACE}}{C_{GS}}}$$



阻尼良好

V_i+

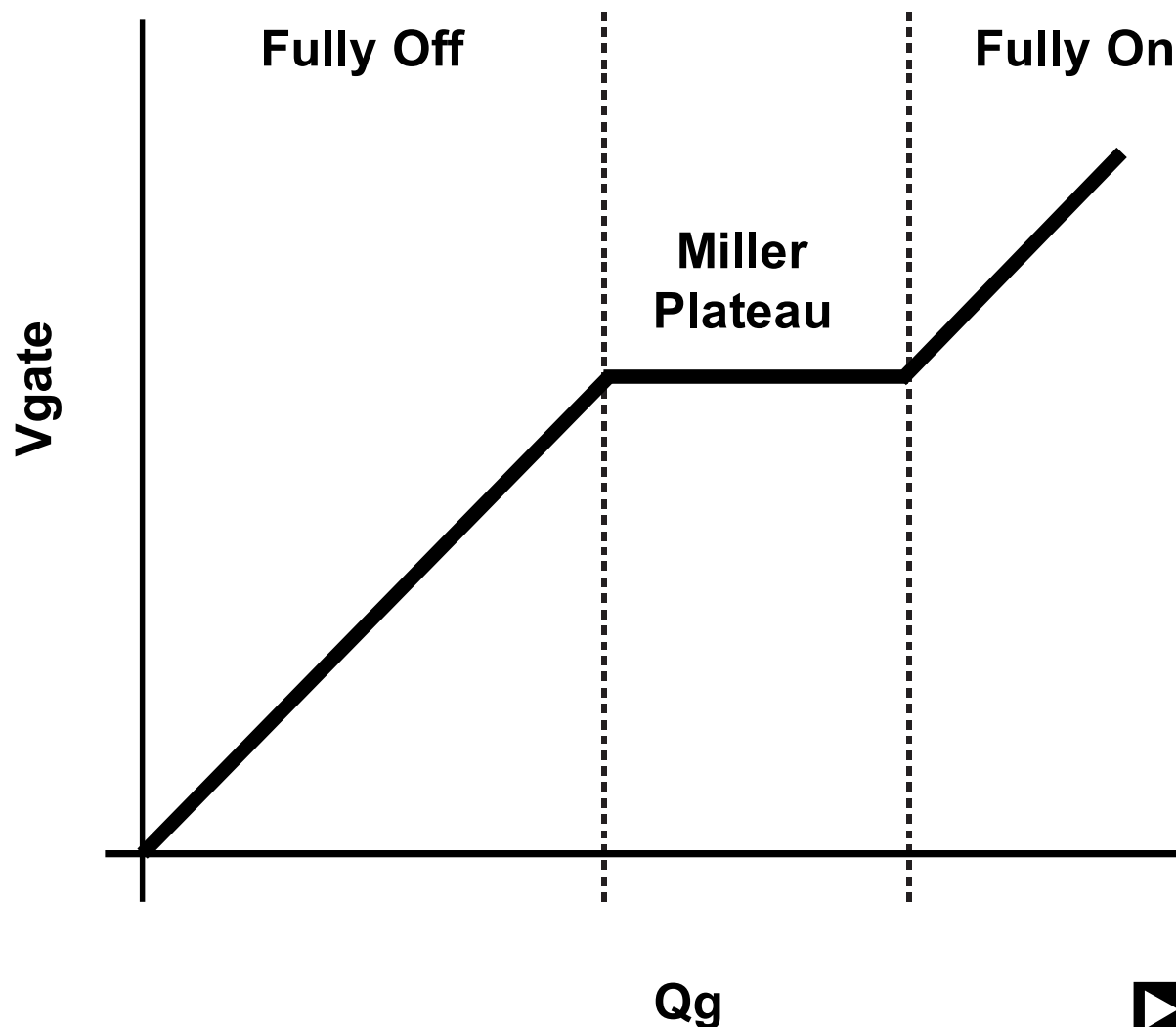
V_{gs}



阻尼欠佳

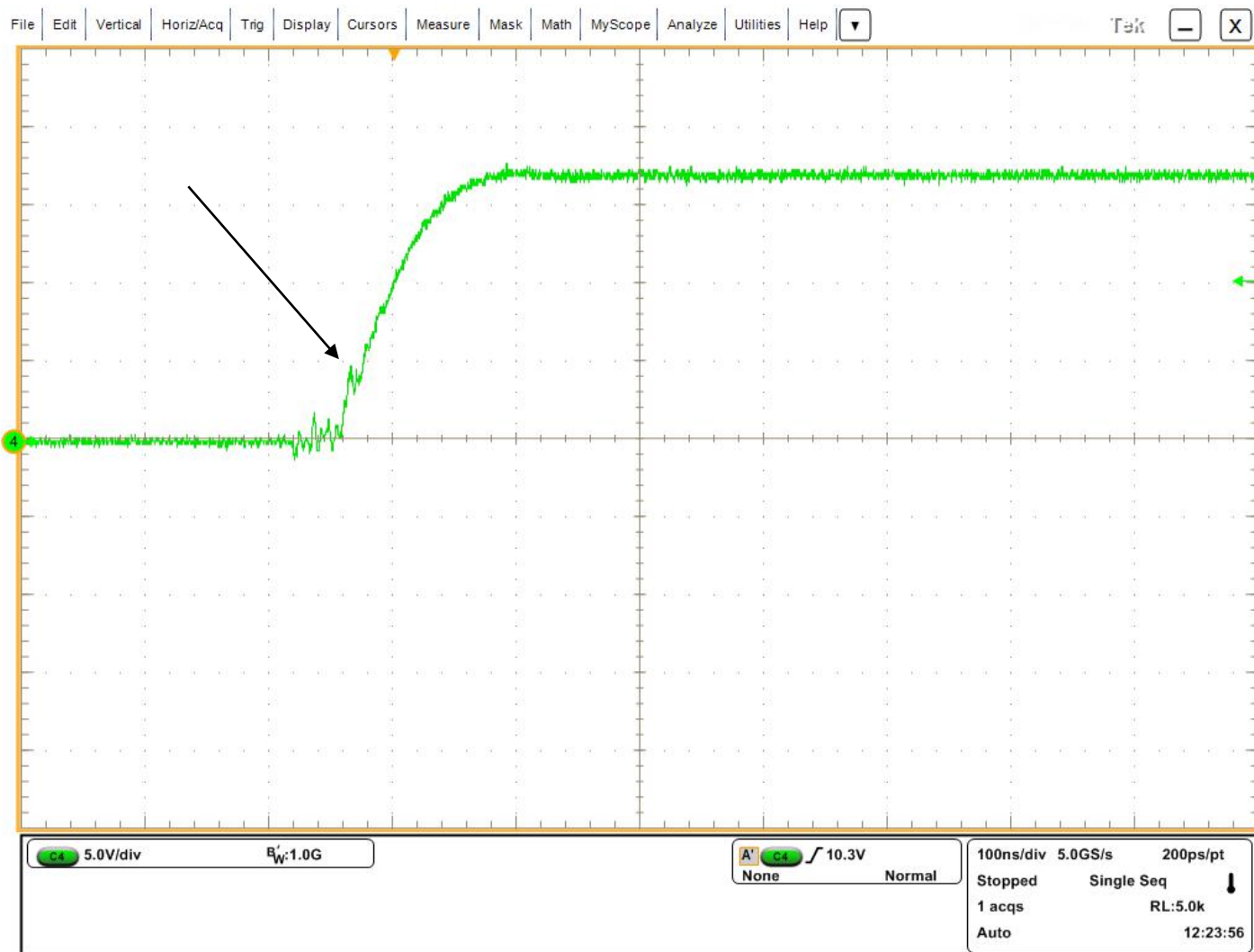
负载考虑

- ▶ 等效负载电容常被用来展示不同栅极驱动器的驱动能力
 - $Q=CV$
- ▶ 实际功率开关中存在米勒平坦区，其中电容会在摆动开启/关闭时变化。
- ▶ 大多数MOSFET/IGBT数据手册中的栅极电压与栅极电荷关系曲线会反映这一现象
- ▶ 电容为 Q/V 的积分



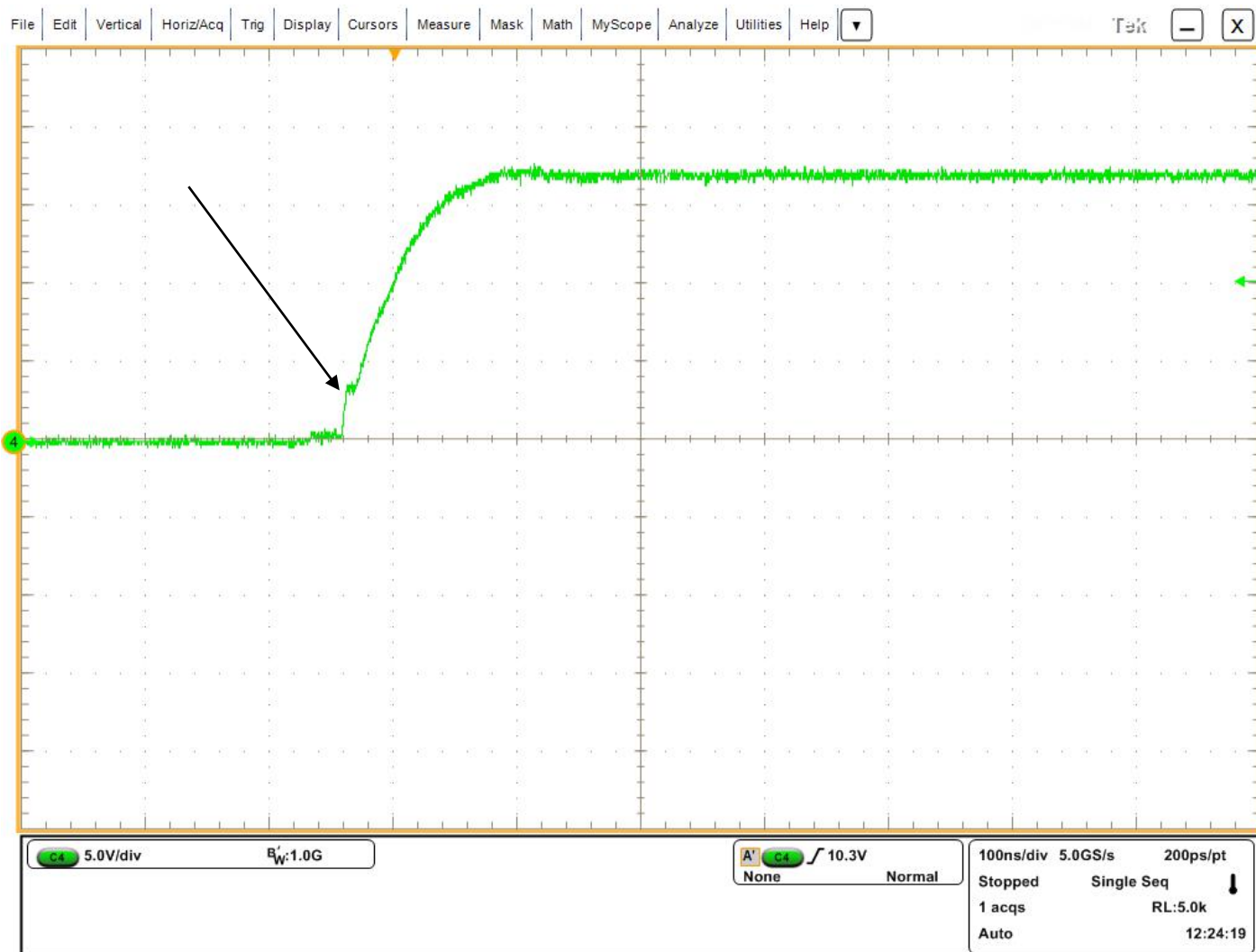
“鼠尾”引线 – 实际SiC MOSFET – ADuM4135驱动器

V_{gs}



“猪尾”引线 – 实际SiC MOSFET – ADuM4135驱动器

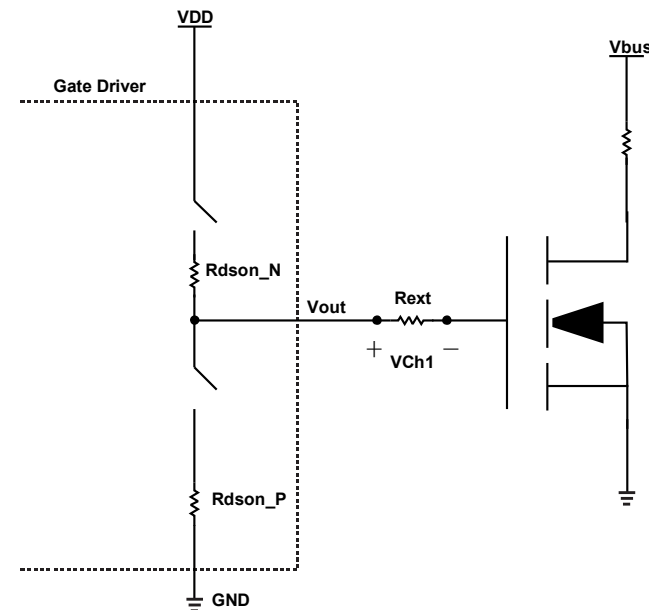
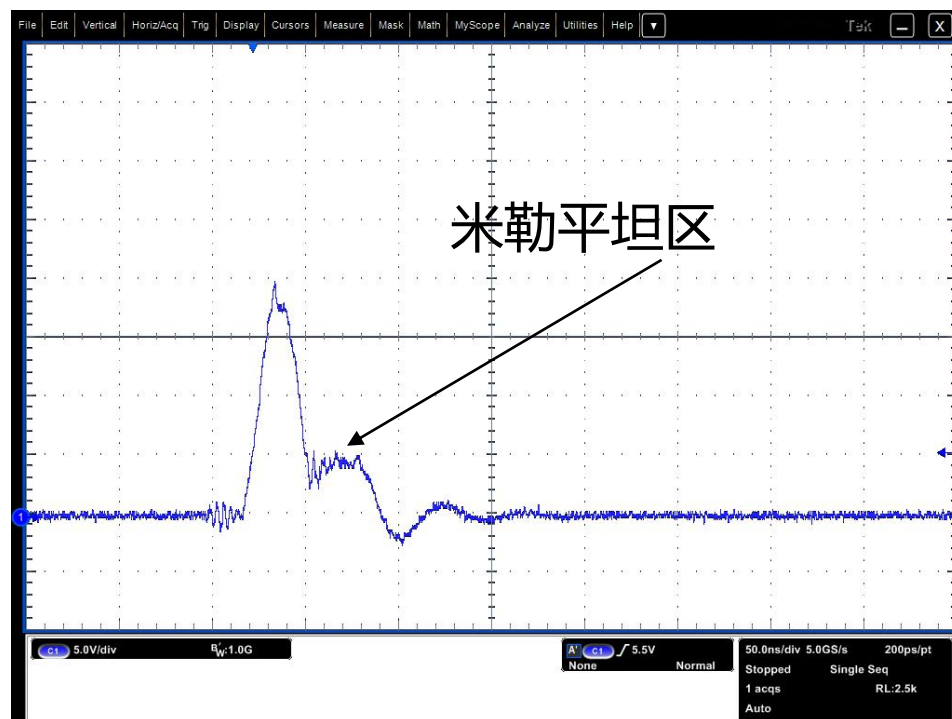
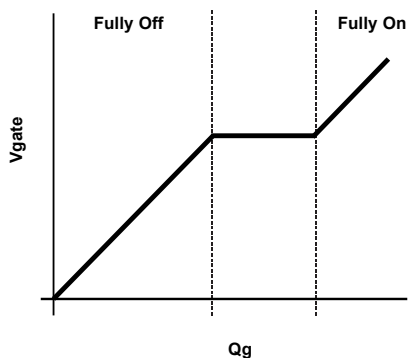
V_{gs}



测量栅极电流

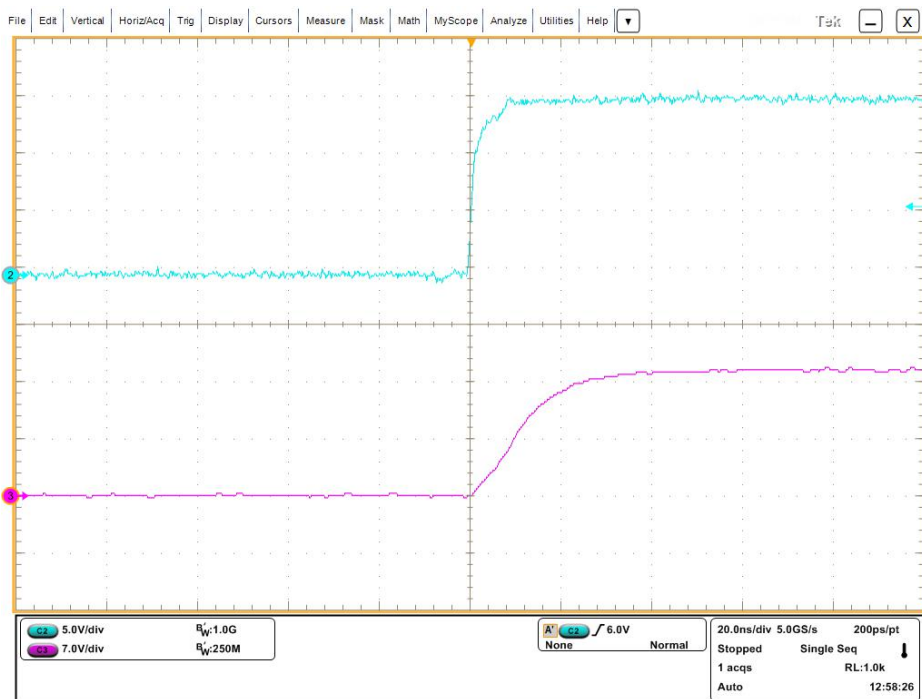
Si IGBT导通事件示例 – 峰值电流测量

- ▶ 实际功率器件的导通电流
- ▶ $R_{ext} = 3.9\ \Omega$
- ▶ $I_{peak} = 5.1\text{ A}$
- ▶ 更高 I_{pk} 确实意味着切换速度更快
 - 但峰值的存在时间非常短



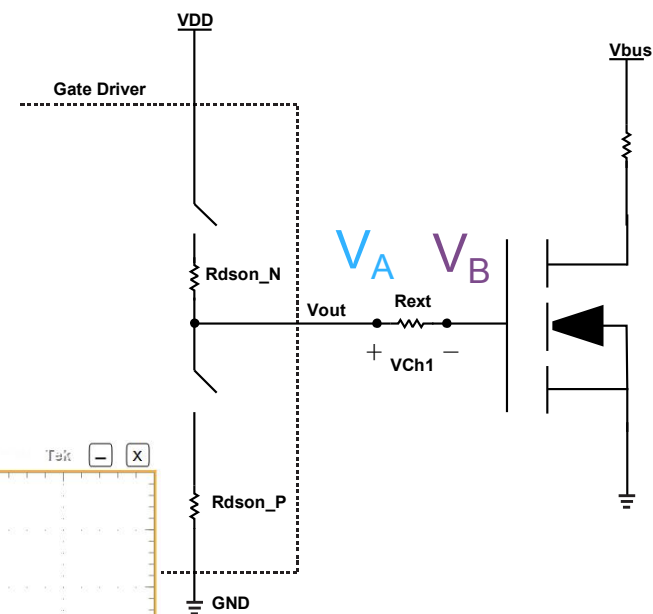
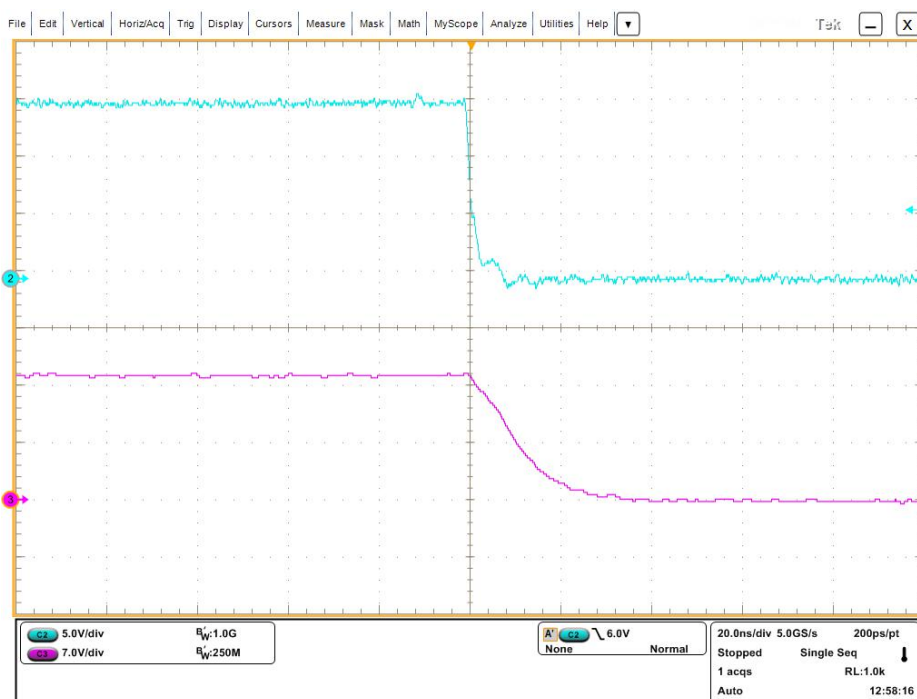
电压测量点

- ▶ 在输出引脚和栅极测量。
- ▶ 栅极受RC影响。差值即为 R_{ext} 上的电压。
- ▶ 电压点之比与功耗分配。



V_A

V_B



峰值电流与Rdson

- ▶ 各制造商的输出电流定义并不一致
- ▶ 有些使用饱和电流，有些使用输出驱动电流
- ▶ 最小值、最大值、典型值
- ▶ ADI偏好比较Rdson，因为毕竟大部分驱动时间不是在饱和区。

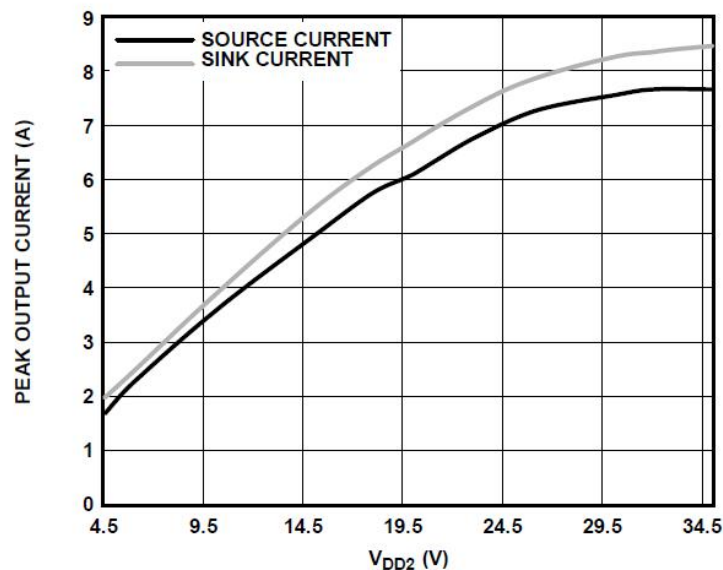
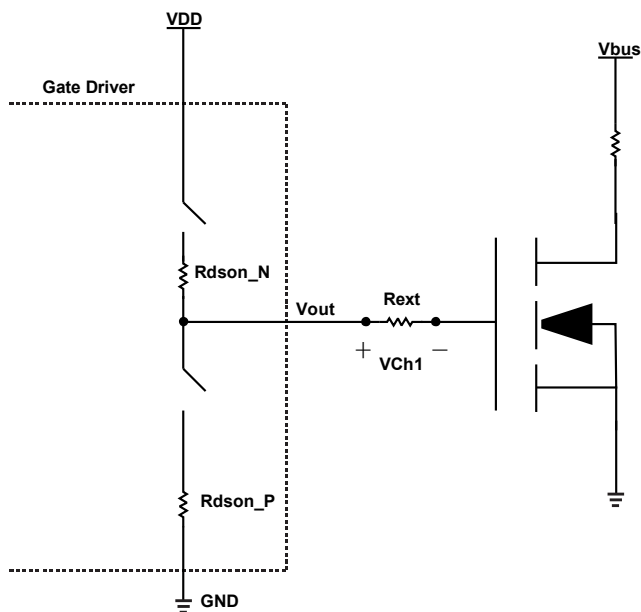
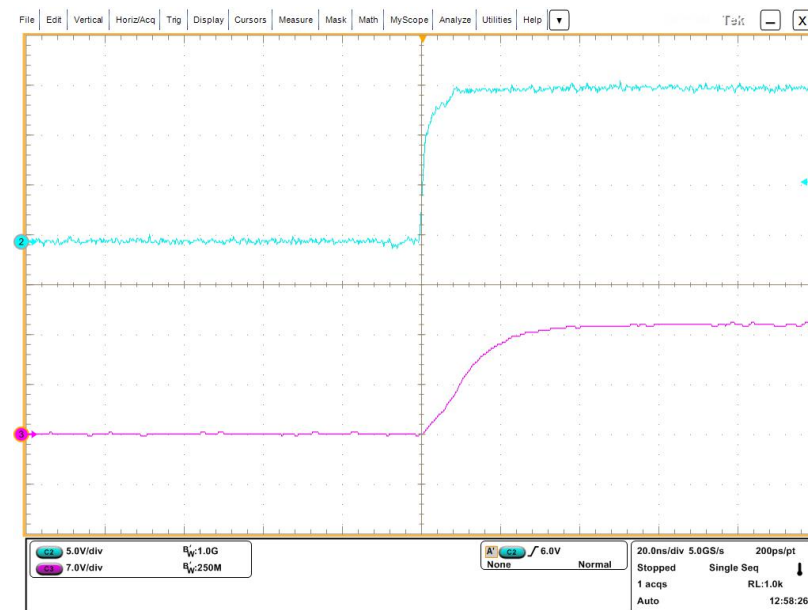


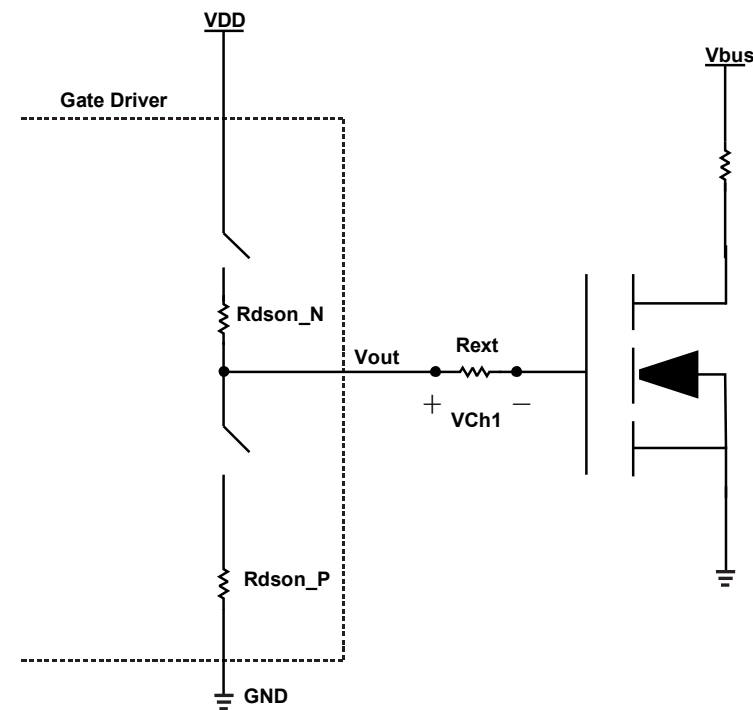
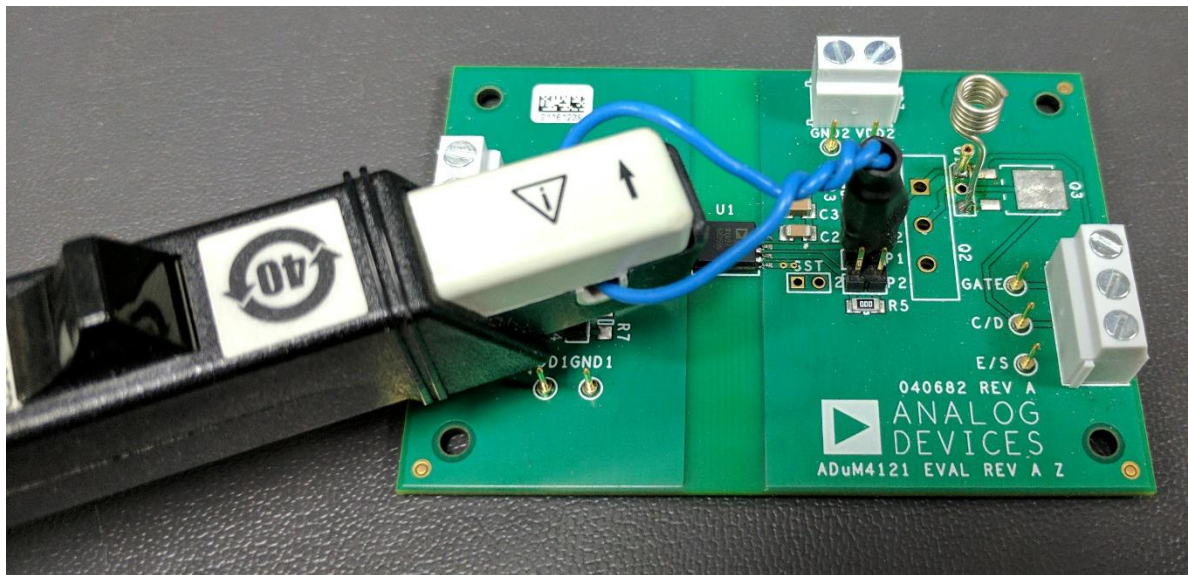
Figure 17. Peak Output Current vs. V_{DD2}, 2 Ω Series Resistance

ADuM4121 – “2 A” 级



峰值电流 – 电流探针考虑事项

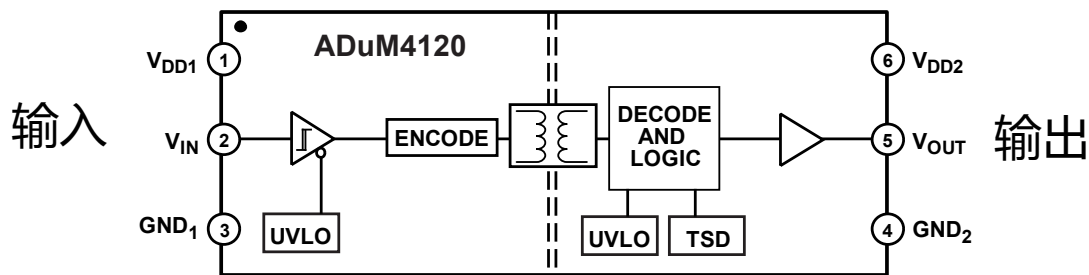
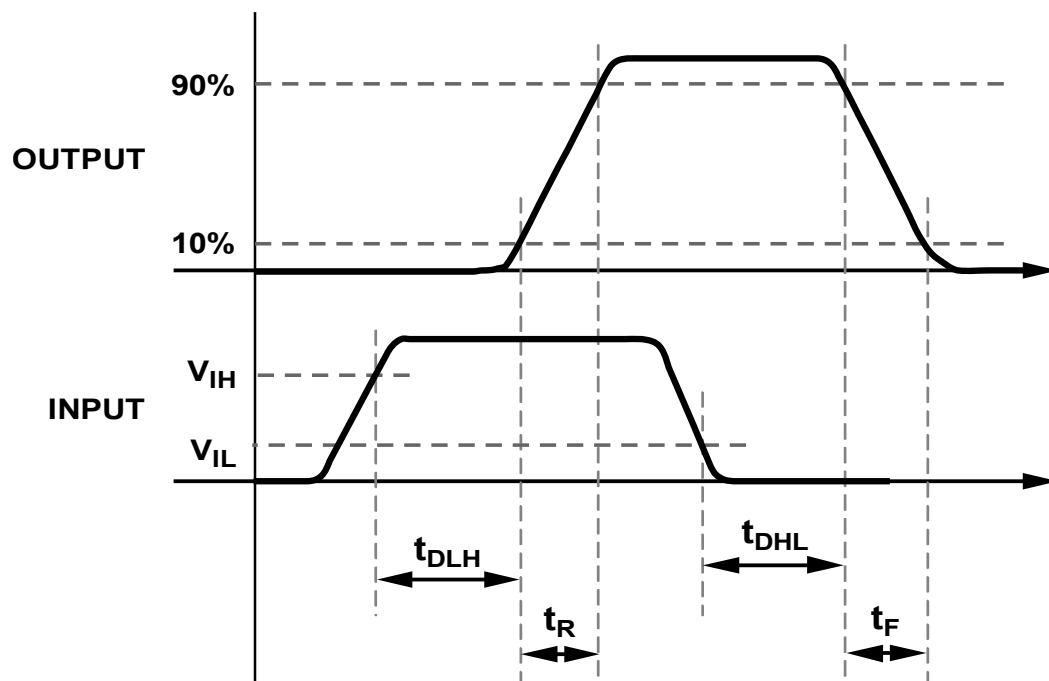
- ▶ 电流探针可用来测量栅极驱动器电流，但有重大缺陷。
 - 增加测量环路意味着电感增大
 - 外部串联电阻已经存在
 - 相比于电压探针，电流探针的带宽通常较低
 - 由于有额外电感，同实际电路并不相似



量化时序指标

时序 - 传播延迟

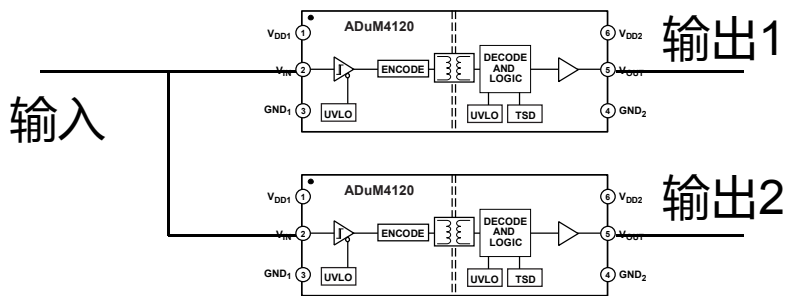
- ▶ 传播延迟(t_{pd}) – 输入边沿到达输出边沿所需的时间
 - 考虑非隔离式栅极驱动器时，如果使用外部隔离器，还应加上该时间。
- ▶ 有时定义为50%到50%
- ▶ 有时定义为 V_{IH} 到10%， V_{IL} 到90%



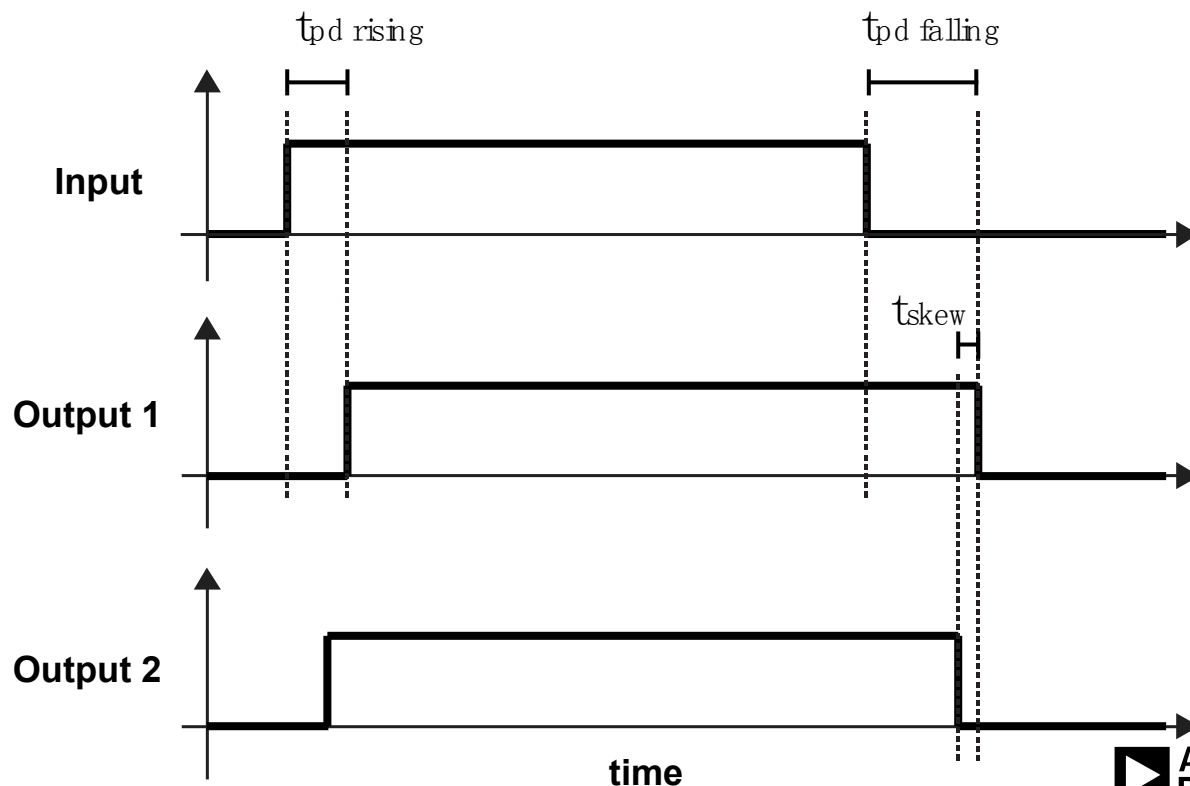
14967-018

时序 - 更多参数

- ▶ 传播延迟偏斜(t_{skew}) – 相同工作条件下响应相同输入的两个不同通道的边沿之差。（定义为通道之间或器件之间的偏差）
- ▶ 脉宽失真(PWD) – 上升延迟与下降延迟之差，通常是指单个器件 – 引起占空比变化。
 - $|t_{\text{pd_rising}} - t_{\text{pd_falling}}|$
- ▶ **PWD与偏斜不是一回事！**

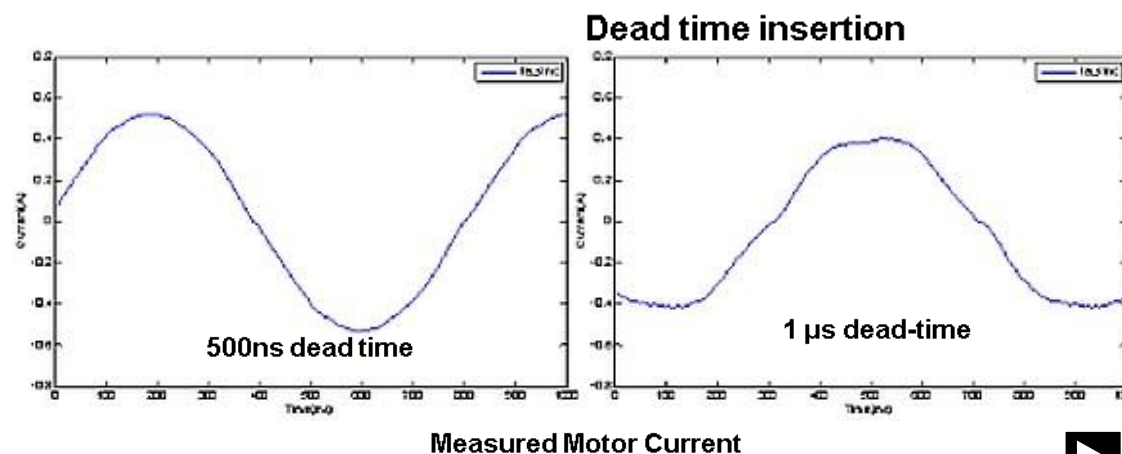
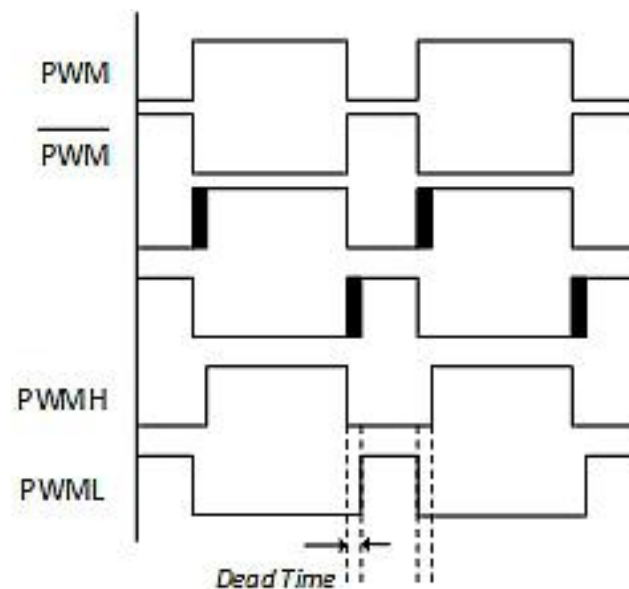


PWD和传播延迟有时可在控制器中进行补偿，但偏斜不能。



低传播延迟偏斜的好处

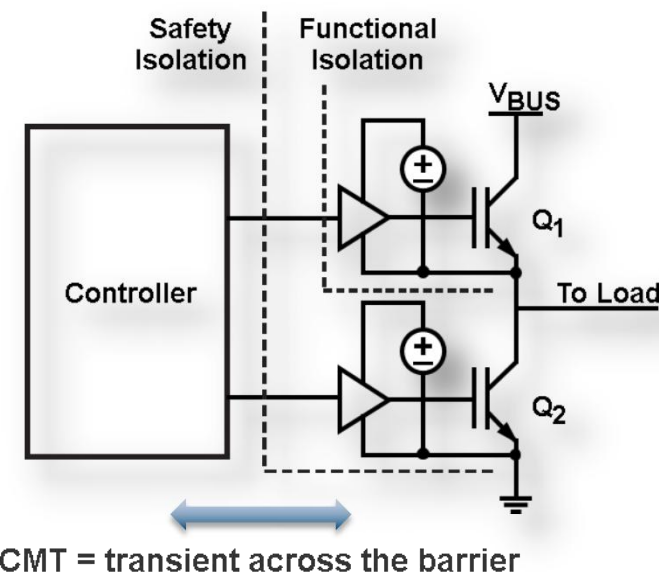
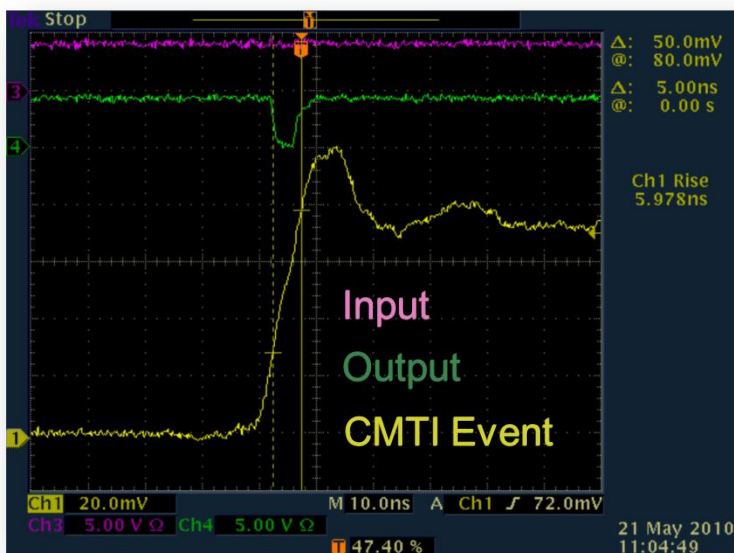
- ▶ 必须将消隐或“死区时间”插入脉宽调制器(PWM)，防止两个功率开关同时导通
- ▶ 低传播延迟偏斜可使所需的死区时间最短
- ▶ 降低电机电流失真和扭矩纹波
 - 使电机运行更平稳
 - 减少轴承/联轴器磨损
- ▶ 提高能效



噪声鲁棒性测量

栅极驱动要求高鲁棒性和精确时序

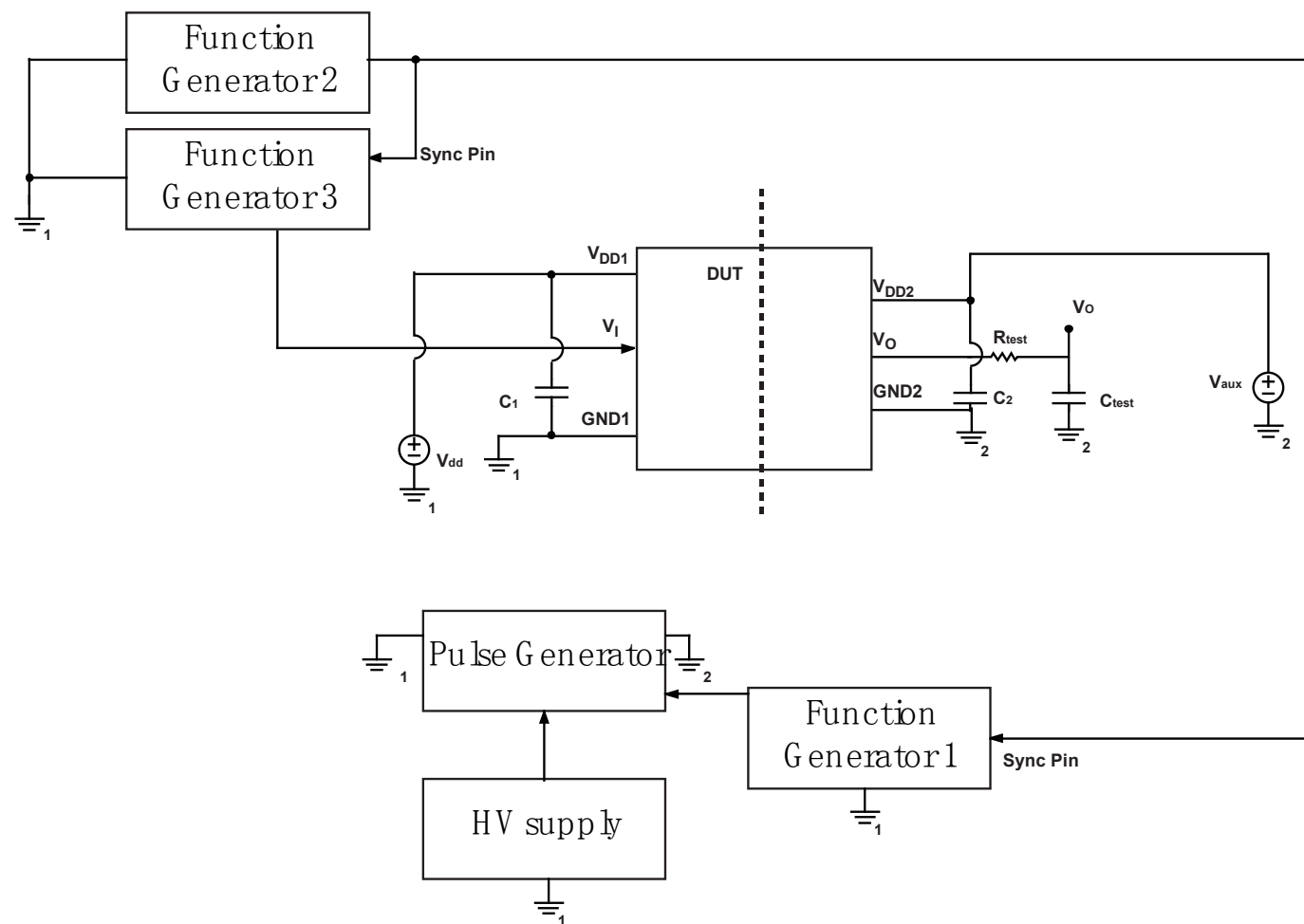
- ▶ 在半桥中，高端栅极驱动器的地相对于半桥中间电压移动
- ▶ 共模瞬变抗扰度(CMTI)
 - 能够耐受隔离栅上的快速速率变化。



- ▶ 容性数据传输链路，10 kV/ μ s CMT
- ▶ 输出暂时切换到低电平以响应共模瞬变
- ▶ 这可能意味着半桥直通，导致高电流流动，可能会损害功率开关

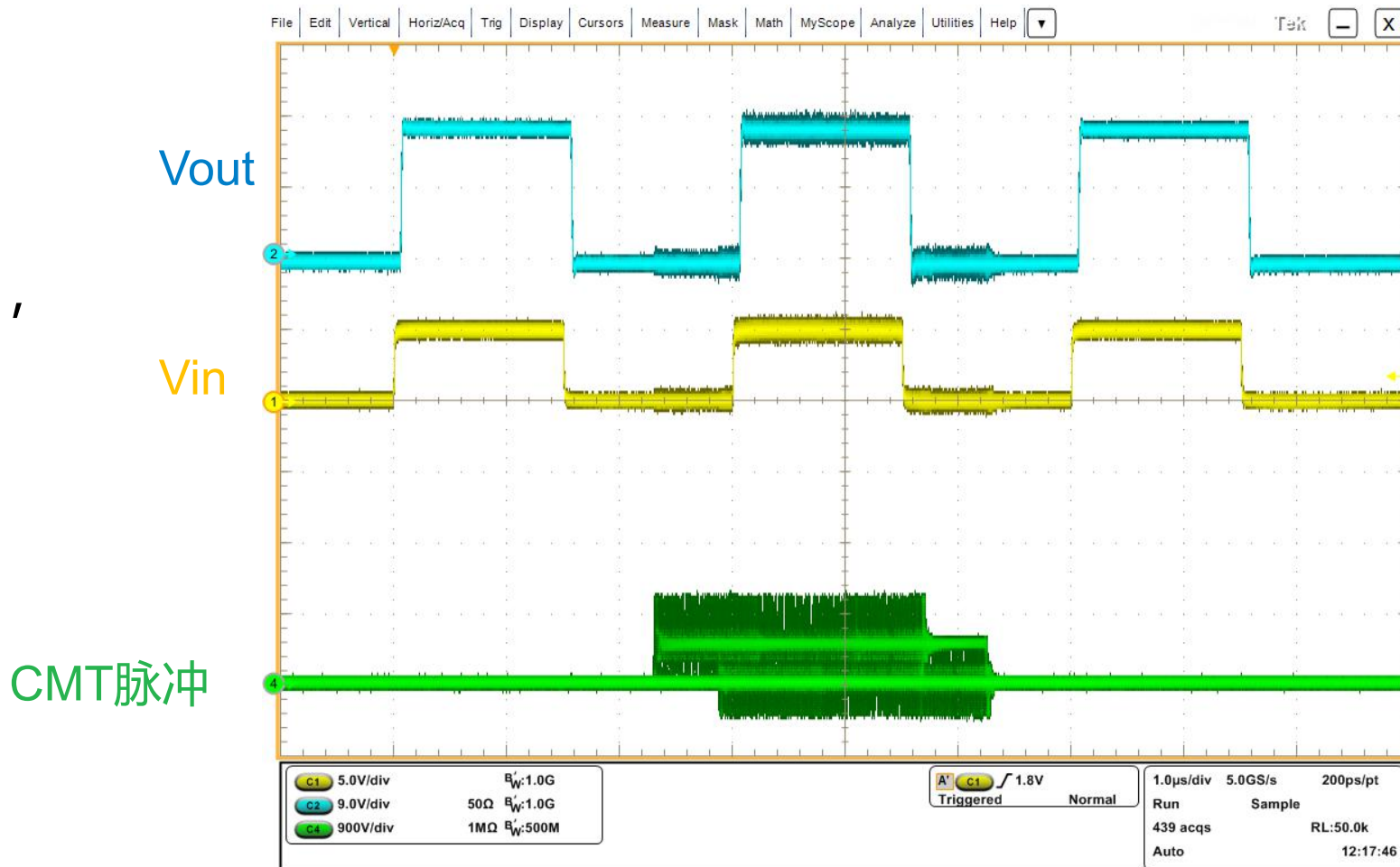
CMTI测试设置

- ▶ 该设置可执行AC和DC CMTI测量
- ▶ 函数发生器使输入和脉冲边沿同步
- ▶ 输出利用高共模差分探针测量 – Tektronix TIVM1



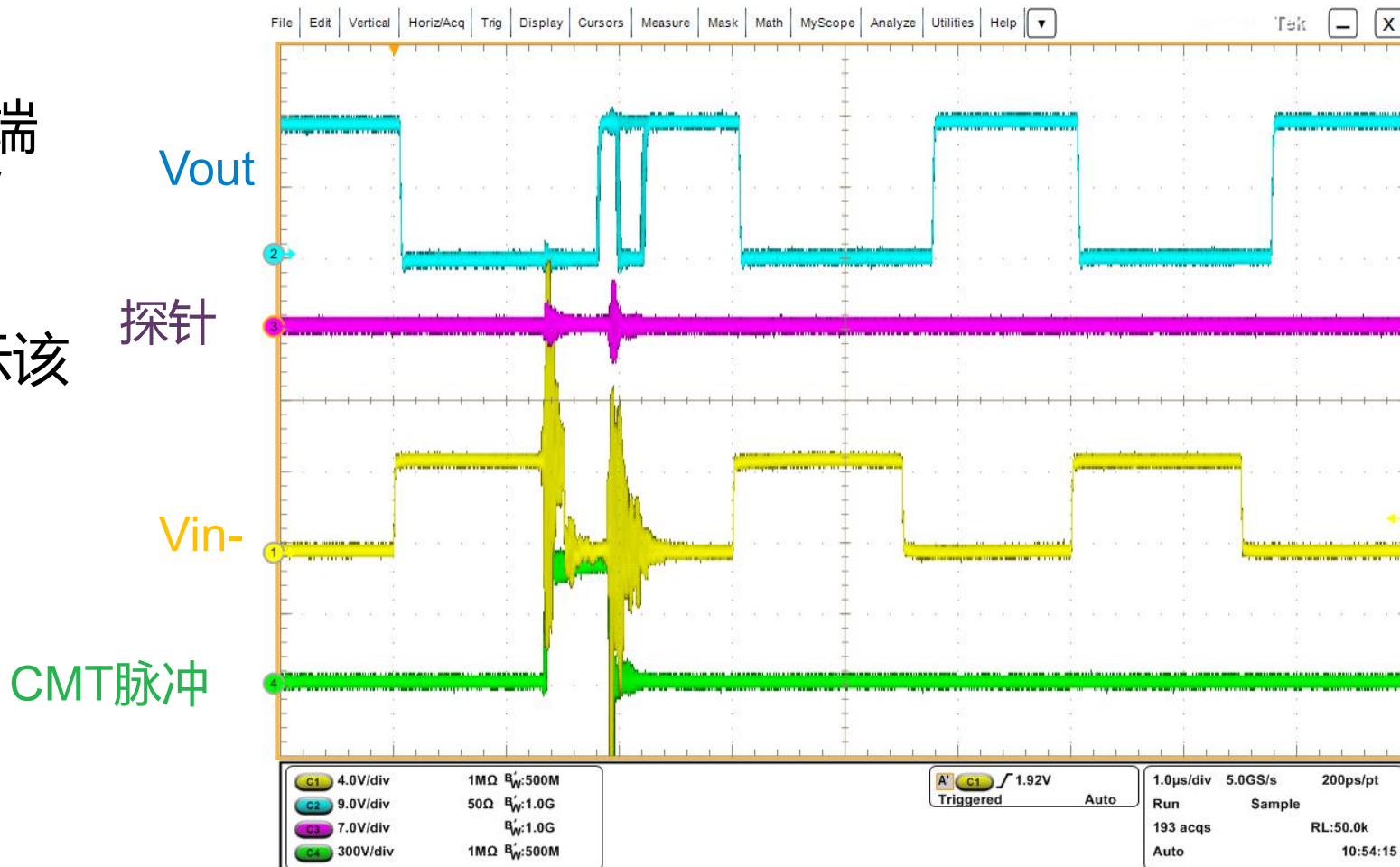
“猪尾” 引线CMTI测量

- ▶ 示波器持续
- ▶ 使用严密的测量环路，噪声不会注入输入引脚
- ▶ CMT脉冲“走”过输入沿，输出沿保持正确时序
- ▶ CMT脉冲的压摆率以 $\text{kV}/\mu\text{s}$ 为单位来报告



“鼠尾”引线CMTI测量 – 测量失败

- ▶ 示波器持续无穷大
- ▶ 输出通道中的偏离由输入端噪声引起，原因是“鼠尾”引线连接。
- ▶ 通道3为未连接探针，显示该区域有多少噪声。



总结

- ▶ 栅极驱动器指标可通过测量验证
- ▶ 保持小测量环路
- ▶ 遵守测量设备的共模和差分限制

本研讨会中提到的产品

▶ [ADuM4135](#)

- 提供米勒箝位的单电源/双电源高电压隔离IGBT栅极驱动器
 - $>100 \text{ kV}/\mu\text{s}$ CMTI
 - 55 ns传播延迟（典型值）

▶ [ADuM4121](#)

- 集成内部米勒箝位的高压、隔离式栅极驱动器，具有热关断功能的2 A输出
- $>150 \text{ kV}/\mu\text{s}$ CMTI
- 35 ns传播延迟（典型值）

谢谢观看！

- ▶ ADI中国地区技术支持热线：4006 100 006
- ▶ ADI中国地区技术支持信箱：
china.support@analog.com
- ▶ ADI样片申请网址：
<http://www.analog.com/zh/sample>