

DC-DC 转换器的输出纹波测量方法 II

Roland van Roy | AN079

输出电压纹波是电源转换器的一个重要参数。某些负载对供电的电压纹波非常敏感，而某些Vcore对供电电压的要求很高，需满足严格的容受范围，其中包括静态容忍度、供电电压纹波和负载瞬态过冲/下冲电压。要能准确测量纹波不容易，特别是对于高频开关式电源转换器。本篇应用笔记将介绍一些实用的设计技巧来测量输出电压纹波。

目录

1	引言	2
2	技巧 1: 检查设备和环境杂讯	3
3	技巧 2: 了解可能期望的纹波信号种类	4
4	技巧 3: 了解寄生效应	6
5	技巧 4: 影响纹波测量的开关转换器中的噪声源	7
6	技巧 5: 低噪声开关信号测量	9
7	实际案例 1: RT6252A ACOT®降压转换器，应用于 12V 到 5V、2A 的小型应用	10
8	实际案例 2: RT5760A ACOT®降压转换器，应用于 5V 到 1.2V, 1A, 小尺寸, 低纹波应用	18
9	DC-DC 转换器增益相位测量设置技巧	24
10	实用增益相位测量范例	25
11	总结/实用建议	29

1 引言

现代电子应用通常包含嵌入式计算和无线连接功能，这些电路通常具有高脉动和重载行为，同时需要低输入电压纹波。因此，新一代的 DC-DC 转换器需要具有快速瞬态响应，以在快速波动的负载条件下维持稳定的输出电压，并且输出纹波应该要很小，以避免损害对敏感电路性能的影响。能够精准地测量功率转换器的输出纹波可能是一项挑战。本文将解释 DC-DC 转换器的输出纹波，并提供有用的设计技巧，以获得更准确的测量结果。

以下列举了一些重要的考虑事项：

- 纹波电压较小，测量设备必须具备足够的灵敏度，有时需要使用特殊探头。示波器通常用于测量供电电压纹波。
- 纹波测量总是在一定的频宽范围内进行。20MHz 频宽最常用，但某些应用可能需要更高的测量频宽，如 200MHz。
- 电源供应器的负载可能对测量到的纹波产生重大影响。这对于在轻载条件下以脉冲跳跃或经济模式运行的电源供应器尤为重要。此外，在纹波测量期间的动态负载变化可能会增加测得的纹波值。
- 测量环境会很容易地影响测量数值，特别是在高频率切换信号附近使用高频宽装置进行测量时。同样，附近的设备，甚至是测量设备本身，都可能将杂音引入纹波测量中，这不应被误解为被测设备产生的杂音。

2 技巧 1：检查设备和环境杂讯

在进行纹波测量之前，需要进行一次环境检查。将测量探头尖端连接到探头的地线，然后将其放置在实验室桌上，如下图所示。设置示波器为最大频宽，并确保具有足够的采样率。

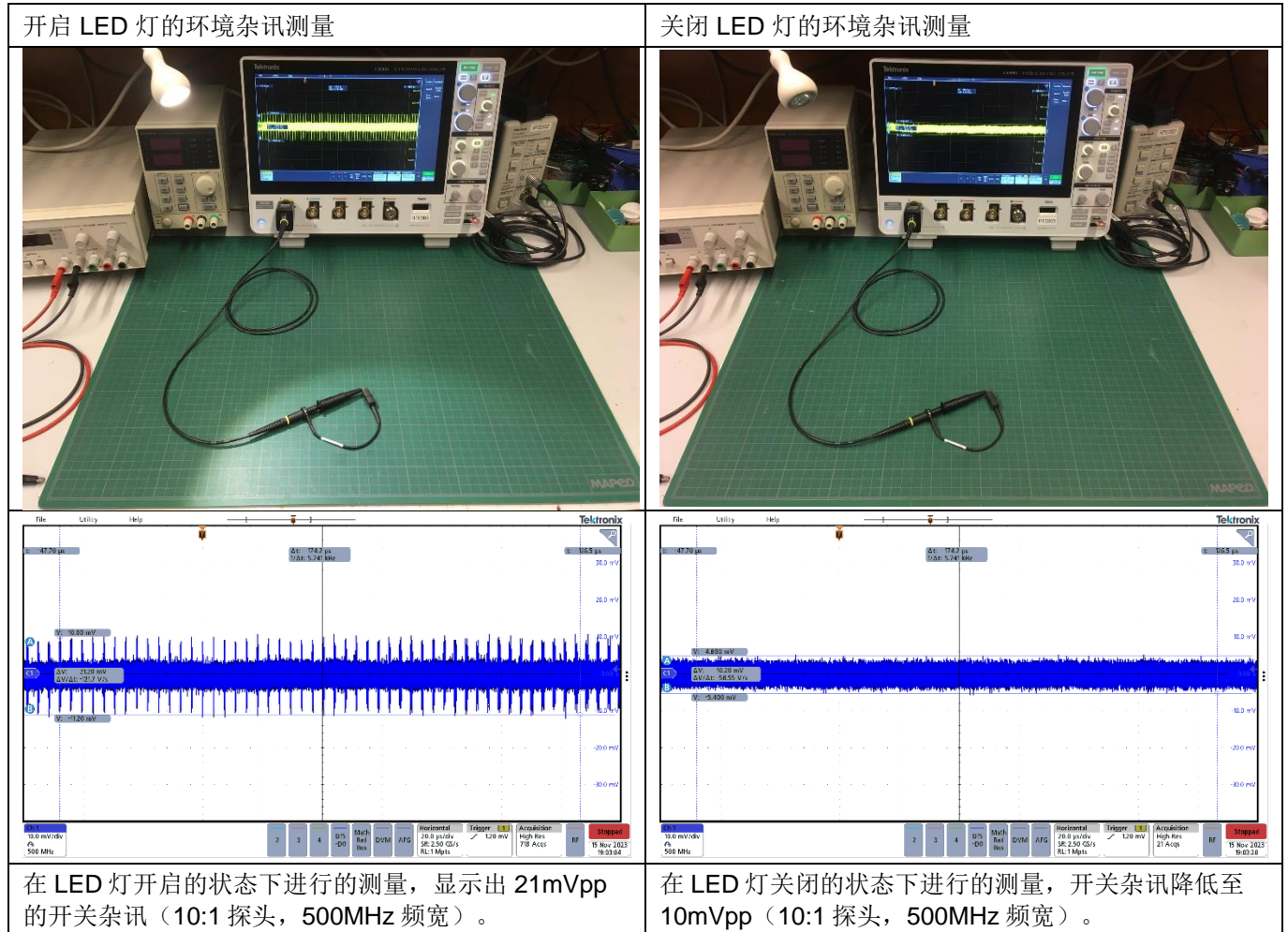


图 1

从上述测量例子可以看出，一个简单的 10:1 探头，在高频宽设置 (500MHz) 下，其接地环路很容易从环境中接收到杂讯。在进行纹波测量时，必须确保杂讯较大的设备已关闭。

3 技巧 2: 了解可能期望的纹波信号种类

在进行纹波测量时，了解可预期的情况也是有帮助的，因此在将示波器连接到您的电路板之前，进行一些纹波计算或模拟是一个好方式。

3.1 连续导通模式 (CCM) 输出纹波

对于降压转换器（图 2），在连续导通模式 (CCM) 中，横跨输出电容器的输出纹波是由于流经输出电容器的电感纹波电流引起的。由于电容器电压是电容器电流的积分，而在 CCM 中的电感纹波电流是一个三角波形，因此在 CCM 中的纯电容器纹波电压由正负的抛物线电压组成，如下图 3 所示。

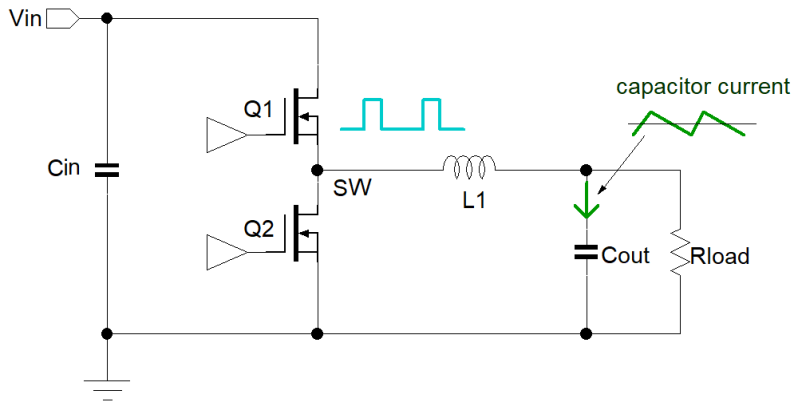


图 2

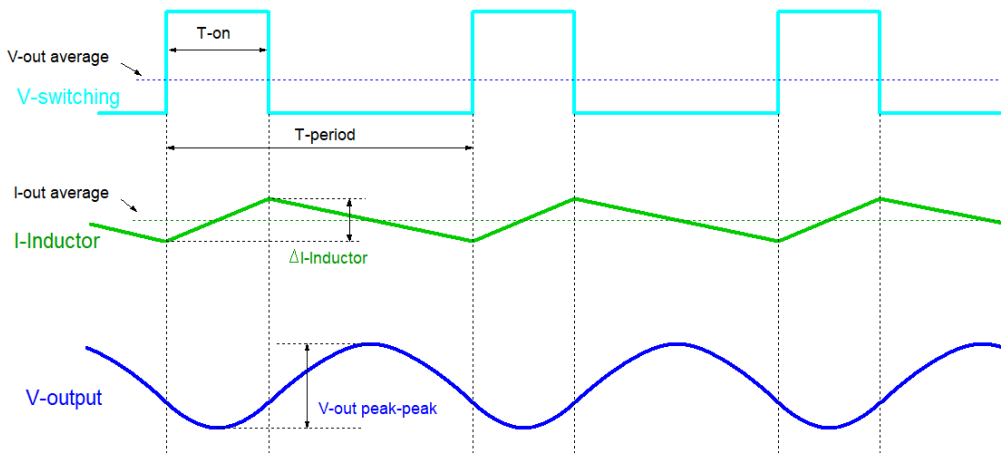


图 3

电感纹波电流 ΔI_L 可以从以下公式计算：
$$\Delta I_L = \frac{V_{OUT}(V_{IN}-V_{OUT})}{V_{IN} \cdot F_{SW} \cdot L}$$

输出电容器纹波电压可以从以下公式计算：
$$\Delta C_{OUT(pp)} = \frac{\Delta I_L(pp)}{8 \cdot C_{OUT} \cdot F_{SW}}$$
 这适用于低 ESR 的多层陶瓷电容 MLCC。

如果输出电容器有一些等效串联电阻 (ESR)，纹波电压将会增加，公式如下：
$$\Delta C_{OUT ESR(pp)} = \Delta I_L(pp) \cdot R_{ESR}$$

在使用 MLCC 电容时，需确保在进行计算时，考虑直流偏压 DC，以获得有效电容值。从公式中可以看出，负载电流不在其中。这意味着在降压转换器保持在连续导通模式 (CCM) 时，输出纹波电压不会随着负载电流的变化而改变。

3.2 脉冲跳跃模式 (PSM) 输出纹波

立锜的降压转换器系列通常有一个在轻载条件下运行于脉冲跳跃模式 (PSM) 的版本。当负载电流减少到某个值时，电感纹波电流谷值将达到零。具有 PSM 模式的零件将开始在二极管仿真模式下工作，这意味着低端 (low-side) MOSFET 只在电感电流的正部分开启。在电感电流变为负值时，高端 (high-side) 和低端 MOSFET 都将关闭，并且开关波形将显示出一些阻尼振铃 (damped ringing)，这是由电感和开关节点的寄生电容的共振引起的。在输出放电的同时，转换器将保持在这种低 Iq 休眠模式中。一旦反馈电压达到 PSM 电压参考阈值，PWM 会开启一段时间 TON (见图 4)。

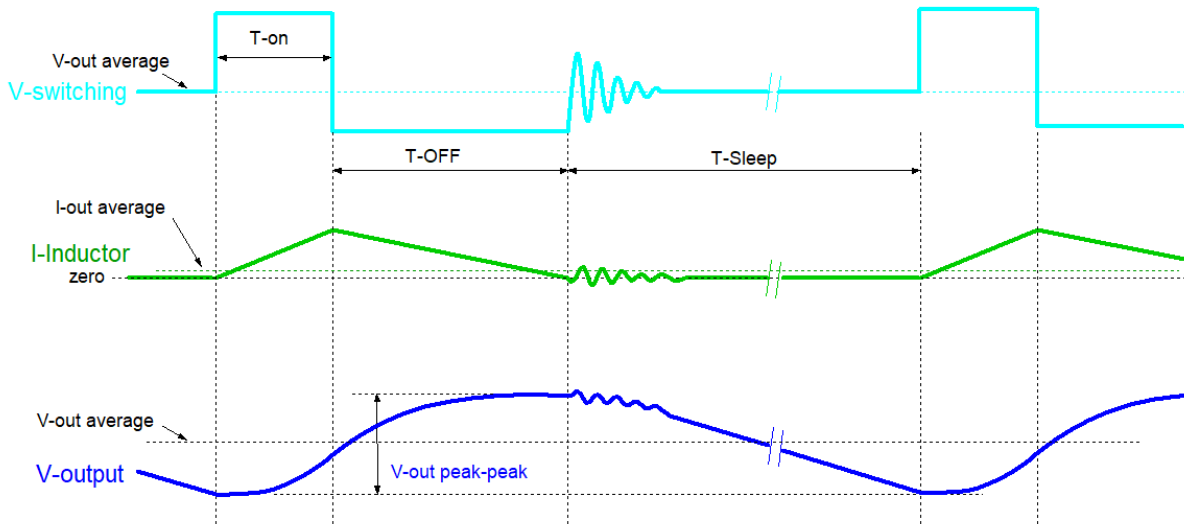


图 4

在轻载条件下的操作中，输出电压将在 TON 和 TOFF 期间由正三角形电流充电，并在 TSLEEP 时间内由负载电流缓慢放电，此时两个 MOSFET 都关闭。

在 PSM 模式下的输出电压纹波可以通过 ([方式进行估算：
$$\Delta V_{OUT\ pp} = \frac{T_{ON}^2}{2LC_{OUT}} \left(\frac{V_{IN}^2}{V_{OUT}} - V_{IN} \right)$$

对于 ACOT® 转换器，在 PSM 模式下的 ON 时间类似于 CCM 模式下的 ON 时间：
$$T_{ON} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} \cdot F_{SW}}$$

电流模式转换器通常在 PSM 期间设定一定的电感峰值电流：
$$\Delta V_{OUT\ pp} = \frac{L}{2 \cdot C_{OUT}} \Delta I_L^2 \left(\frac{V_{IN}}{V_{OUT} (V_{IN} - V_{OUT})} \right)$$

PSM 输出纹波幅度取决于负载电流：当负载增加时，纹波幅度将减小，因为负载电流在 TON + TOFF 期间也会放电电容器。上述公式适用于非常轻（实际上为零）的负载和单次 TON 的 PSM。

4 技巧 3: 了解寄生效应

转换器输出纹波可能会受到组件寄生参数的影响，特别是在较高的开关频率下。

输出电容 ESR 将向输出纹波中添加一个三角波电压。MLCC 电容的 ESR 非常低，约为 3 至 5mΩ。聚合物电容的 ESR 较高，通常在 10 至 50mΩ 之间。对于这些类型，输出纹波中的三角波形将更加明显。

输出电容还具有寄生串联电感 ESL。对于 MLCC 类型，ESL 相当小，约为 0.2 至 0.4nH，但聚合物电容的 ESL 较高，约为 1 至 2nH。在降压转换器中，ESL 将会在总电压中添加一个方波。不同电容器寄生参数的影响显示在图 5 中。

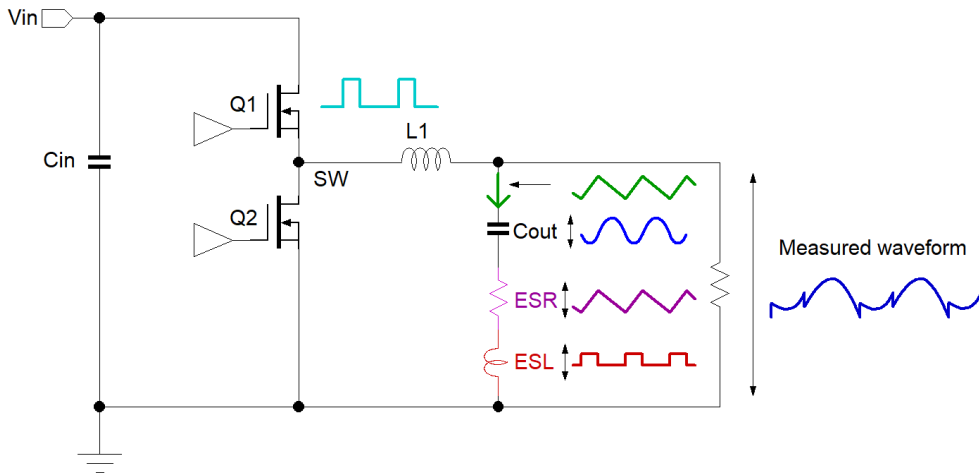


图 5

电感具有寄生并联电容，取决于结构、尺寸和额定值，范围从几个到 10~15pF 不等。电感的并联电容将使一些快速边缘的开关波形转移到输出，导致测得波形中的高频尖峰（见图 6）。您需要将示波器设置为高频宽以查看这些尖峰。

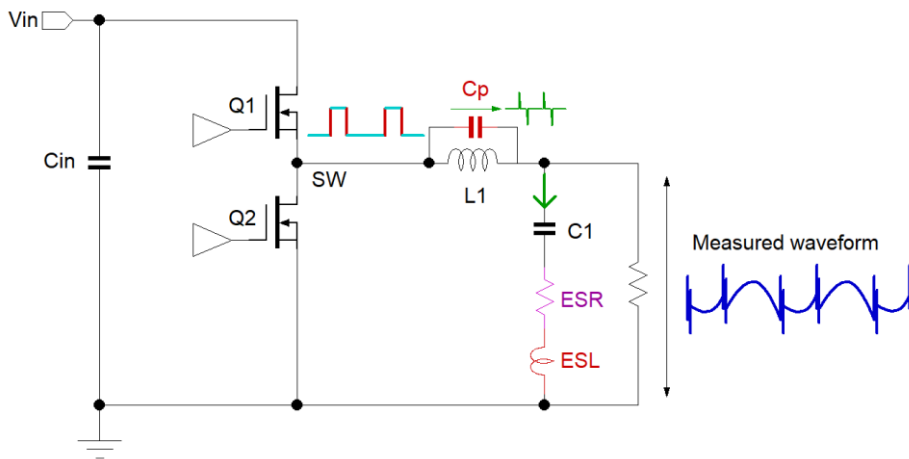


图 6

5 技巧 4：影响纹波测量的开关转换器中的噪声源

输出纹波通常很小，因此示波器需要设置为高电压灵敏度。这种设置很容易受到电源产生的杂讯的影响。最常见的杂讯源之一是电感的漂移磁场 (stray magnetic field)。许多常见的便宜电感是半屏蔽的 I 型磁心，其绕线周围包裹着铁氧体粉末环氧树脂。这些电感仍会产生相当大的漂移磁场。任何附近的回路都会收到一些漂移磁场，并且回路电感会在回路端产生一小部分方波电压。

图 7 显示了一个尺寸紧密的降压转换器电路板，带有半屏蔽线圈，以及示波器探头带有相对较大的接地线环。这个环可能会捕捉到电感的漂移磁场，而导致在输出电压纹波测量中增加一个方波。

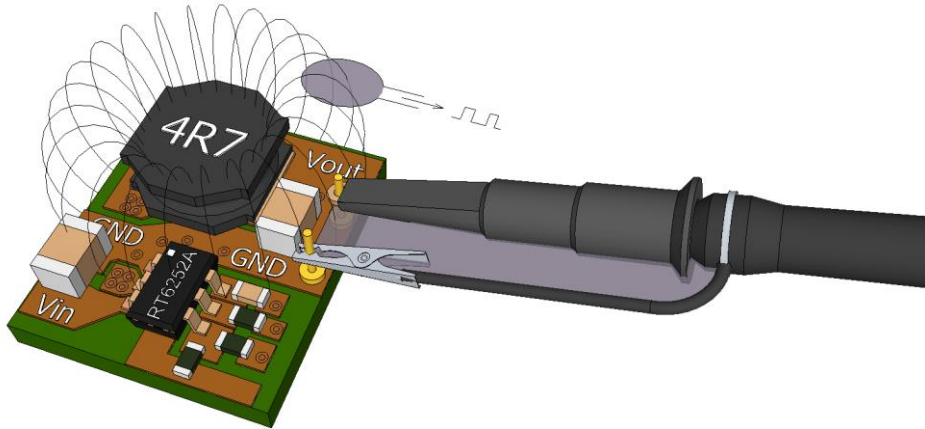


图 7

图 8 (红色波形) 显示了在测量时受到漂移磁场影响可能产生的输出纹波波形：可以看到开关转换器的方波被附加在纹波电压上。附加波形的极性取决于电感的方向和接收回路的方向。

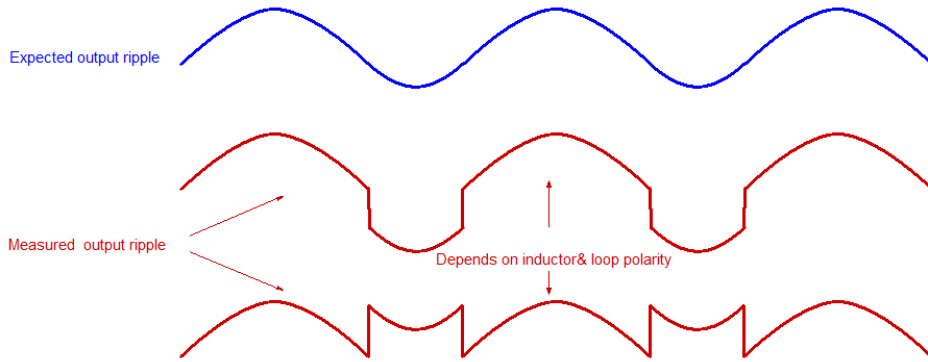


图 8

在底部的红色波形中，波形中的电压步阶可能是由输出电容器的 ESL 引起的，或者是由电场辐射进入探头尖端和接地的测量回路引起的。这可以通过移动探头来检查：如果在不同方向移动探头环时，超载方波有振幅变化，表示杂讯是由于探头环的漂移场引起。这就是为什么在测量靠近电感时，探头尖端到探头地端的回圈要最小化的重要原因。另一种检查的方法是在 PCB 上反转电感的方向：如果附加波形的极性反转，则表示纹波波形中的电压跳跃也来自于探头环的漂移场。

图 9 显示了一种更好的测量输出纹波的方法：长接地线被环绕在探头尖端接地环周围的短弹簧所取代。这种方式可以显著减小了接地回圈的面积，并减少了漂移场的影响。

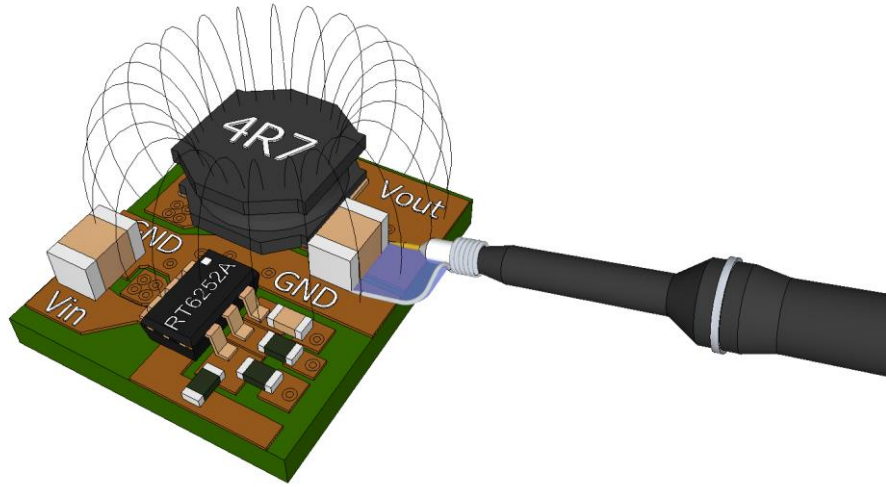


图 9

然而，在某些情况下，即使是更小的回圈仍然会耦合杂散磁场，特别是在高频转换器中，而且是在测量点非常靠近电感时。对于这些情况，最好使用一小段扭曲的电线，让输出电容器端的回圈面积变得非常小，并且将探头连接到距离电感有一定距离远的地方，如图 10 所示。使用扭曲电线的方法也会更容易将脆弱的探头尖端连接到测量点。IC 封装引脚的量测也可以如此使用。

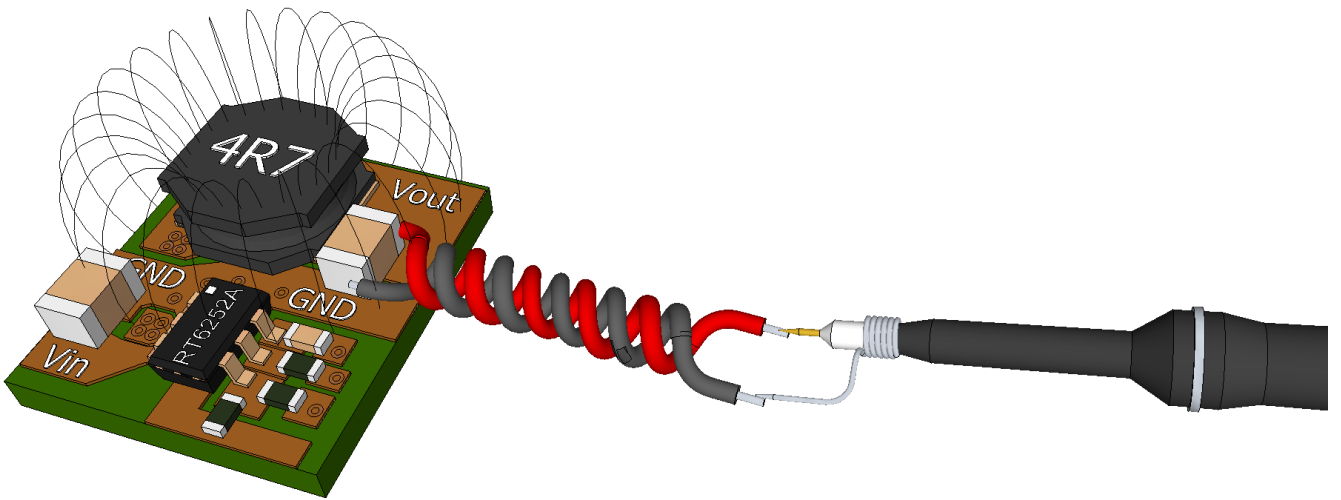


图 10

6 技巧 5：低噪声开关信号测量

有时可能会希望同时可以测量开关波形和输出纹波电压，例如利用开关波形触发示波器。当直接连接第二个探头到开关信号，如图 11 所示，您会发现这种连接会在输出纹波电压测量上添加大量的开关杂讯。

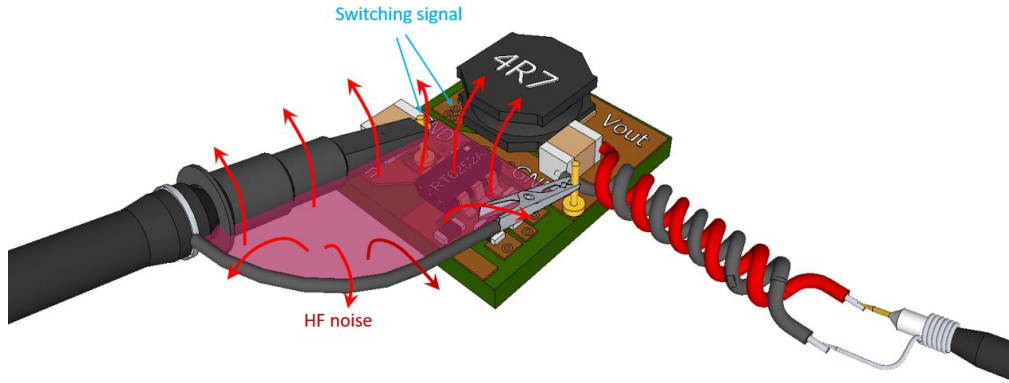


图 11

在纹波测量中出现的额外开关杂讯是由于测量开关波形的 CH2 探头的探头电容引起的：开关信号的快速上升和下降时间导致高频电流脉冲进入长的 CH2 探头线。这种高频电流会引起大量高频辐射，而这种高频杂讯则会进入输出电压纹波测量中。

您可以尝试使用非常短的接地线来连接 CH2 探头与开关信号，但更简单的解决方法，是最小化 CH2 探头中的高频电流。可以通过将 CH2 探头放置在靠近开关信号的位置，而不是直接连接到开关信号上，来收集到有用的开关信号。在这种情况下，CH2 探头中的高频电流是最小的，且 CH1 纹波测量就不受到影响。当然，您将失去开关信号的直流信号，但对于在开关波形上触发示波器，电容式取样 (capacitive pick-up) 的效果良好。一个简单方式可以实现稳定的开关信号电容式取样，就是将一根绝缘的电线焊接到开关信号上：将电线的绝缘部分部分拉出，并将探头夹在绝缘的顶部。探头夹到电线内部导线的距离将决定电容式取样的量。见图 12。

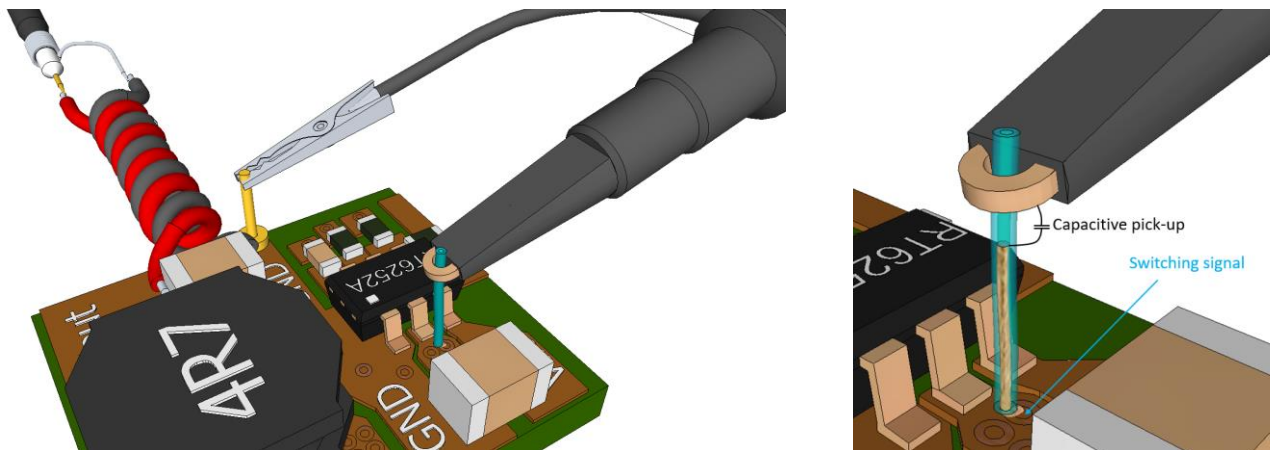


图 12

7 实际案例 1: [RT6252A](#) ACOT[®]降压转换器, 应用于 12V 到 5V、2A 的小型应用

[RT6252A](#) 是一款成本效益高、额定电压为 17V 的第三代 ACOT[®] 降压转换器, 具有 2A 的输出电流能力, 并在轻载时自动进入 PSM 模式。转换器在 CCM 模式下运行, 频率为 580kHz。EVB 的原理图和布局如图 13 所示。

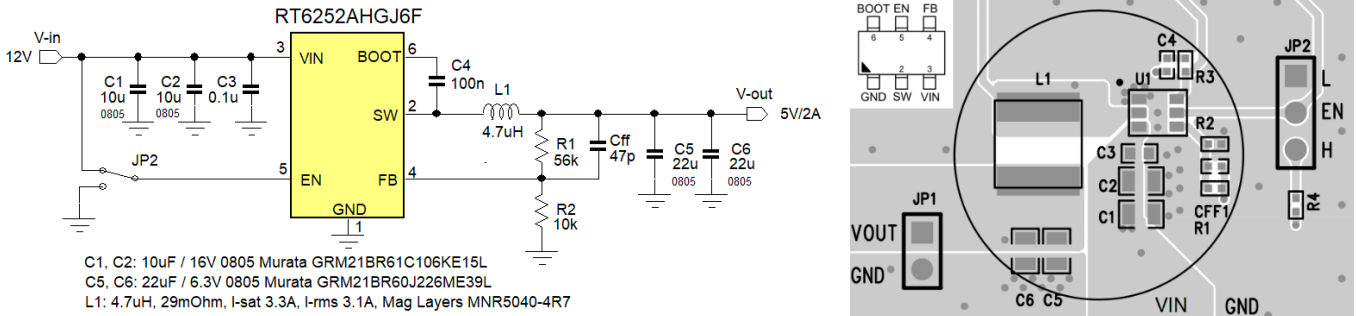


图 13

两个 22μF/6.3V 的 0805 MLCC 输出电容在 5V 直流偏压下, 降至 8μF, 而在低交流电压纹波下, 可能再下降 30%。每个电容的 ESR 为 3mΩ 左右, 并且约为 0.2nH 的 ESL (参见图 14)。对于这个应用的计算, 我们使用 14μF 的总电容、1.5mΩ 的总 ESR 和 0.1nH 的总 ESL。

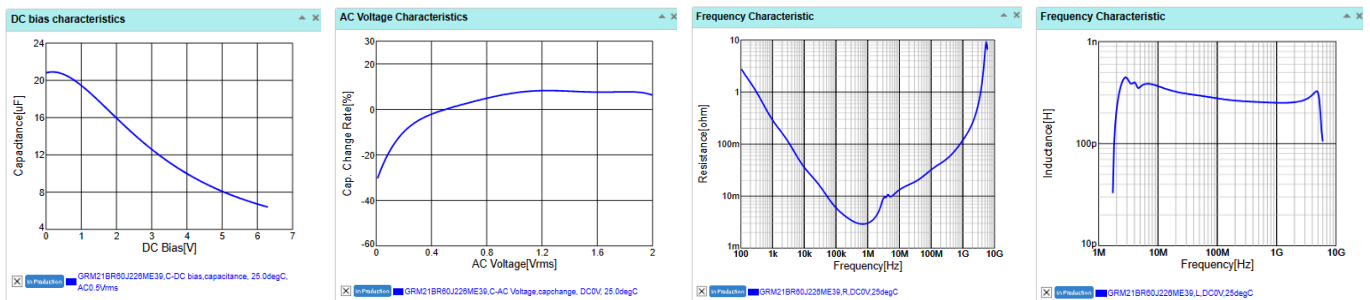


图 14

电感 MNR5040-4R7 的自谐振频率为 43MHz, 因此 C-parallel 为 2.9pF。

$$\Delta I_L = \frac{V_{OUT}(V_{IN}-V_{OUT})}{V_{IN} \cdot F_{SW} \cdot L} \text{ 为 } 1.1\text{A}_{pp}$$

$$\Delta C_{OUT(pp)} = \frac{\Delta I_L(pp)}{8 \cdot C_{OUT} \cdot F_{SW}} \text{ 为 } 17\text{mV}_{pp}$$

这个 1.5mΩ 的等效串联电阻增加了 $\Delta C_{OUT ESR(pp)} = \Delta I_L(pp) \cdot R_{ESR} = 1.7\text{mV}_{pp}$, 因此总和的 CCM 纹波为 18.7mVpp。

对于具有寄生组件的高频行为，一个简单的 LTSpice 模拟显示如下结果：（见图 15）

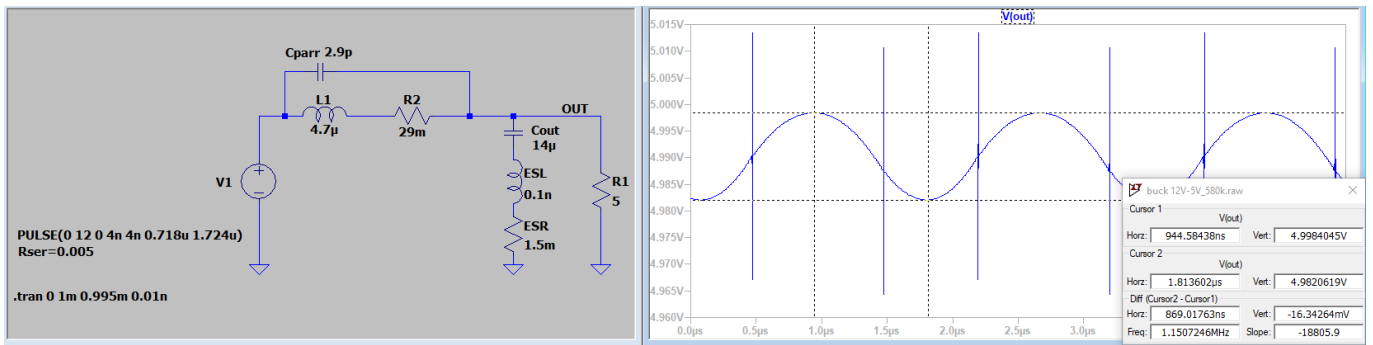


图 15

7.1 第一个带有接地回圈的测量装置（见图 16）

我们连接了一个 5Ω (1A) 的负载电阻，以进行 CCM 操作，并将 CH1 探针（黄色环）与输出电容器连接，形成大的接地回路。CH2 探头（青色环）用于使用电容式取样方法来测量开关波形。

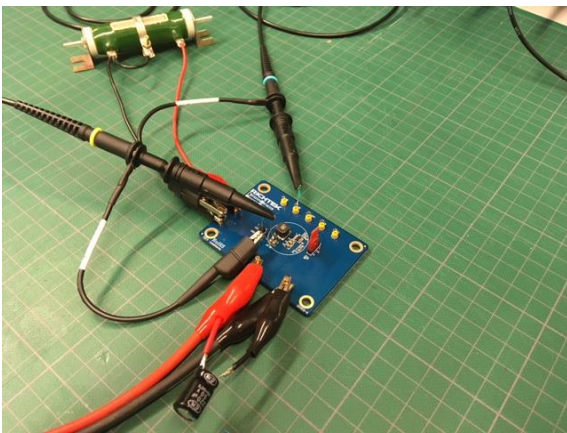


图 16

有关 DC-DC 转换器中电感方向的注意事项：SMD 电感最好安装在这样的方向，其中绕线的开始（靠近内部磁心）连接到开关节点。在 Buck 转换器中，外部绕线将连接到输出电容节点（它在高频时具有低阻抗），因此外部绕线充当了开关信号的屏蔽层。这有助于改善 EMI。当将绕线端连接到开关节点时，外部绕线区域将散发更多的高频电场。

在改变电感器方向同时，漂移磁场也将反转，这都可能会影响纹波测量。

第一种量测结果 (图 17)

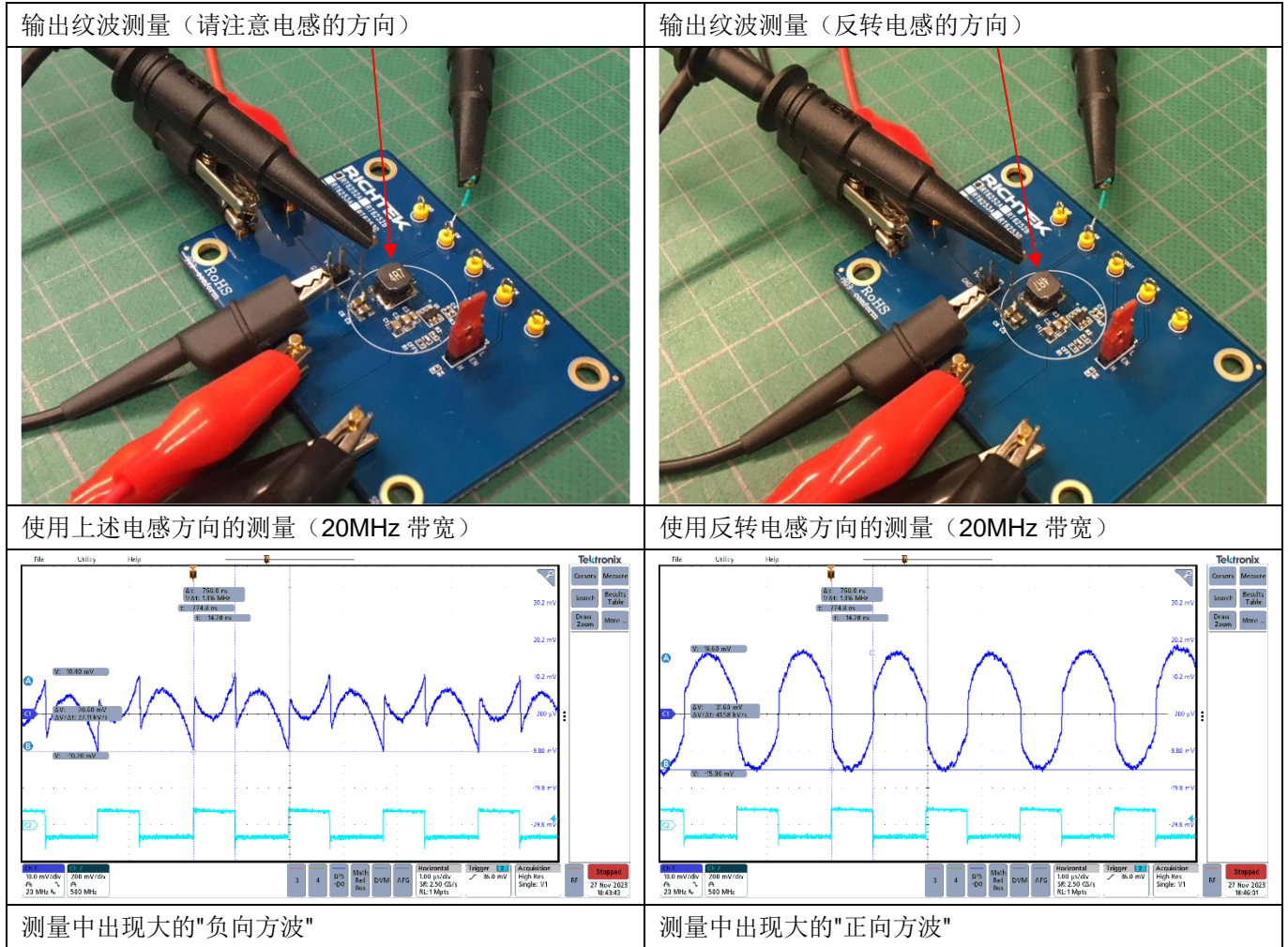


图 17

从测量中可以看出，此设置中的 CH1 探头接收了相当多的电感漂移场向，导致纹波电压中出现大的电压方波。而反转电感方向时，纹波电压的形状仍存在很大的差异。因此，纹波测量都不准确。

7.2 第二个带有较小接地回圈的测量设置 (图 18)

在这里，我们使用 CH1 探头 (黄色环)，它带有较短的接地回圈，连接到输出电压测量的接点。CH2 探头 (青色环) 用于使用电容式取样方法测量开关波形。

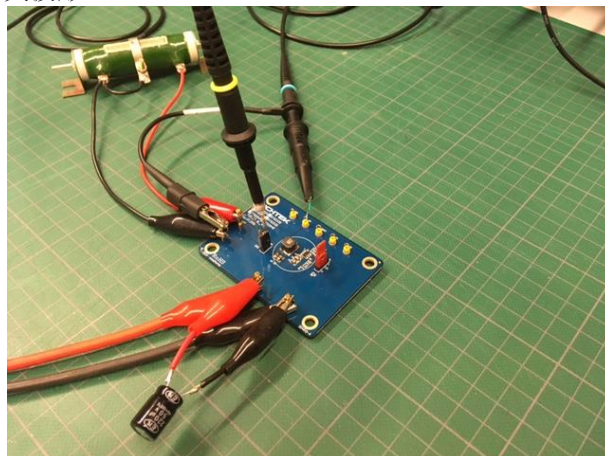


图 18

第二种量测结果(图 19)

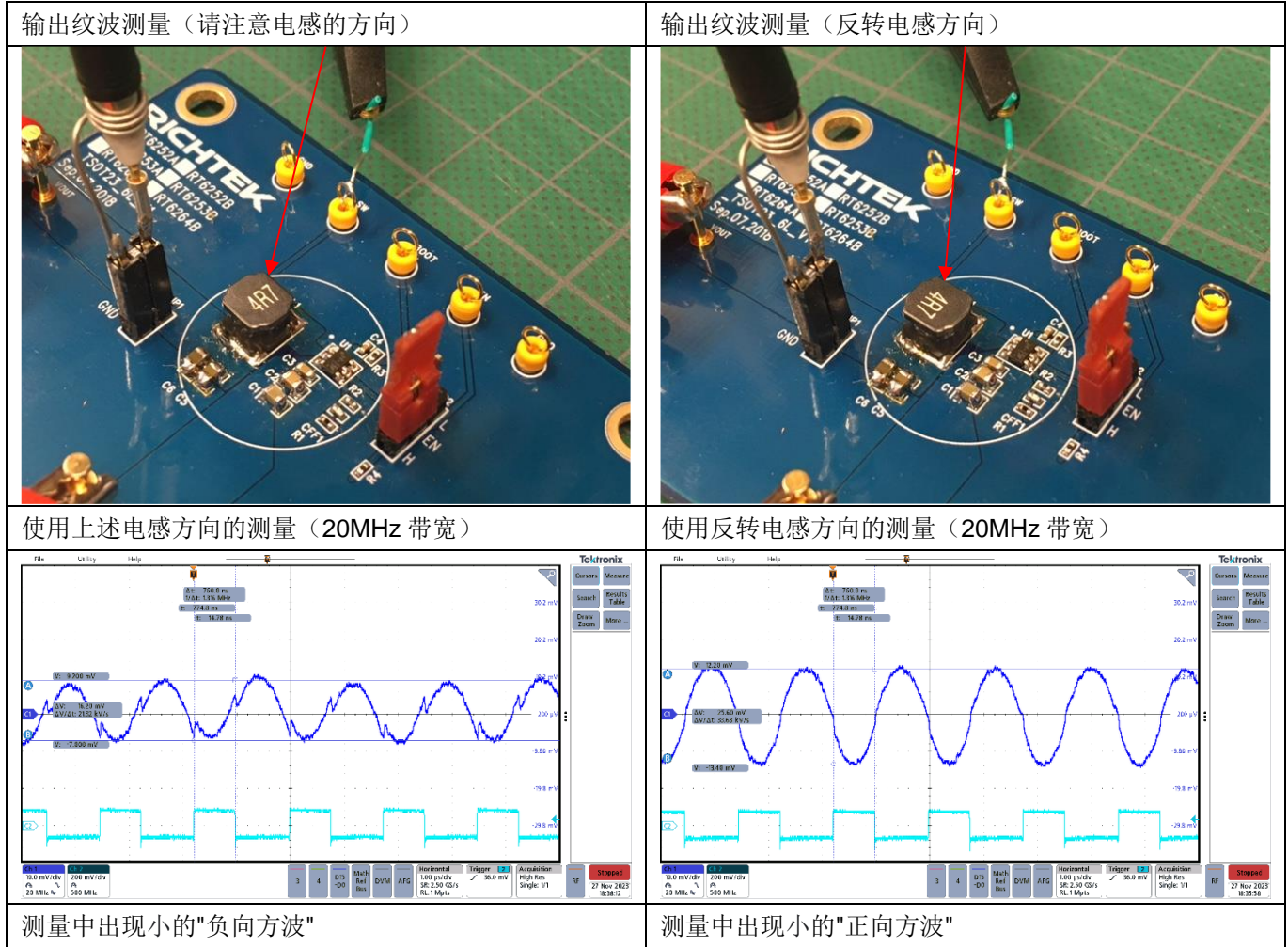


图 19

从第二次测量可以看出，较小的探头回圈耦合的电感漂移场要少得多，但在改变电感方向时，两次测量之间仍然存在一些差异。

7.3 第三个带有扭曲电线的测量设置 (图 20)

在这里，我们将一根扭转的电线与输出电容器相连，形成一个非常小的回圈。扭曲的电线回圈在输出电容器上也是垂直的，以最小化电感漂移场的耦合。CH1 探头（黄色环）连接到扭曲电线的另一端，带有短地回圈，远离电感和开关的轨迹。CH2 探头（青色环）用于使用电容式取样方法以测量开关波形。

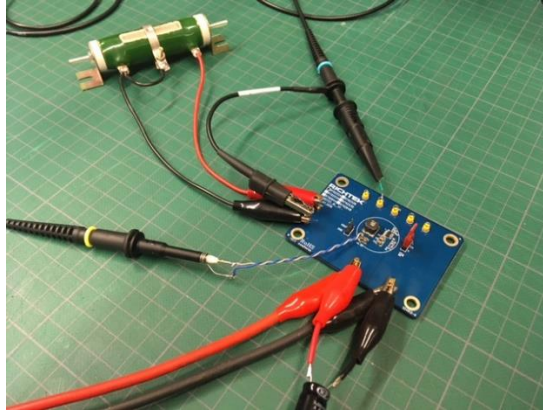


图 20

第三种量测结果 (图 21)

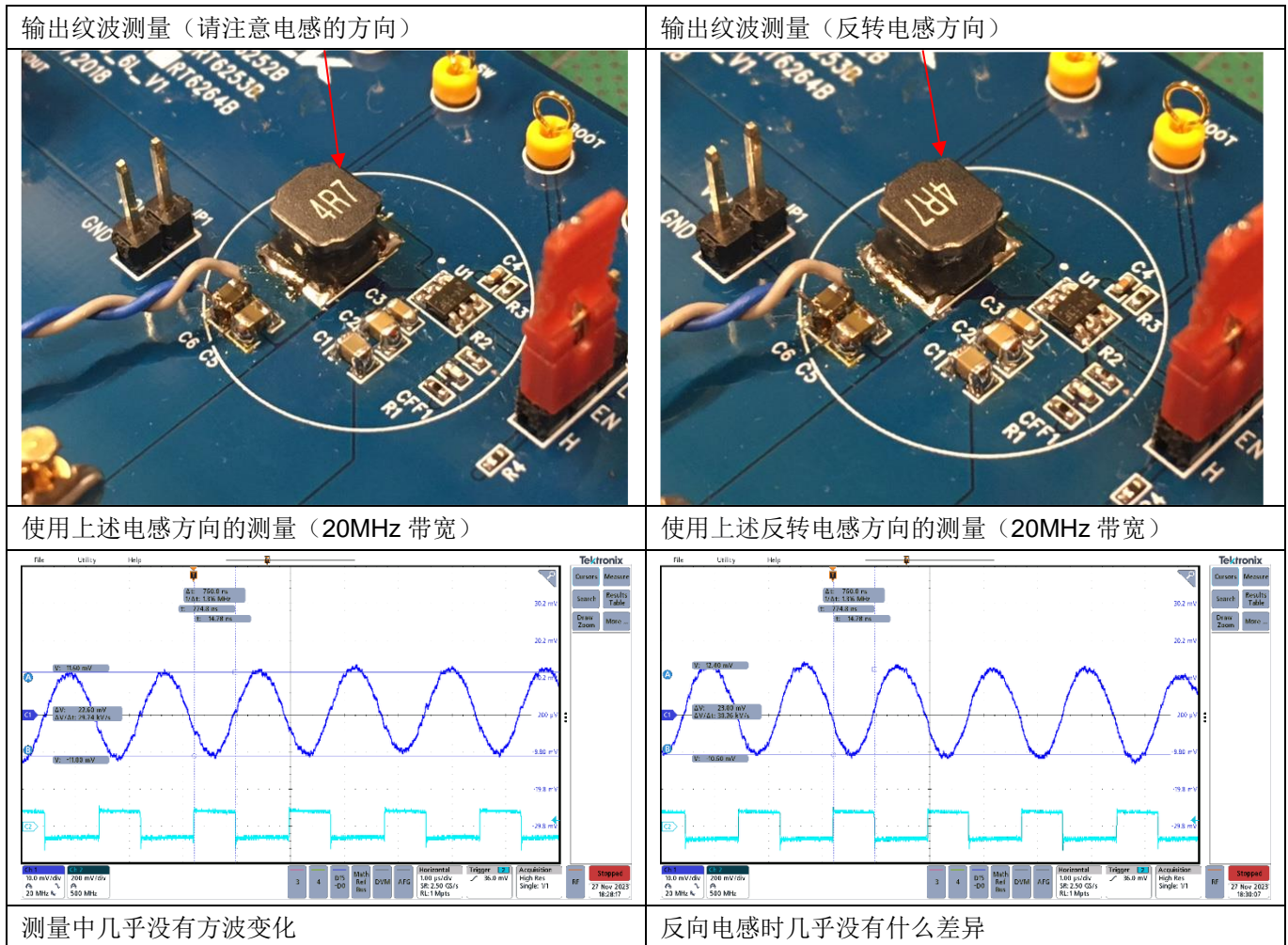


图 21

扭转电线方法呈现出非常清晰的输出纹波测量，而且反转电感方向时波形也几乎不变，这意味着测量中几乎没有漂移场耦合。CCM纹波测量为22.6mVpp，略高于计算的18.7mVpp。请注意，ACOT[®]转换器存在一些频率抖动（OFF时间变化），这导致测量纹波振幅中的一些不规则性。

7.4 高频宽设置 (500MHz) 的测量：检查 CH2 探头开关信号测量的影响

图 22 显示了在测量开关信号时，直接使用探头连接和电容式取样方法之间的差异。

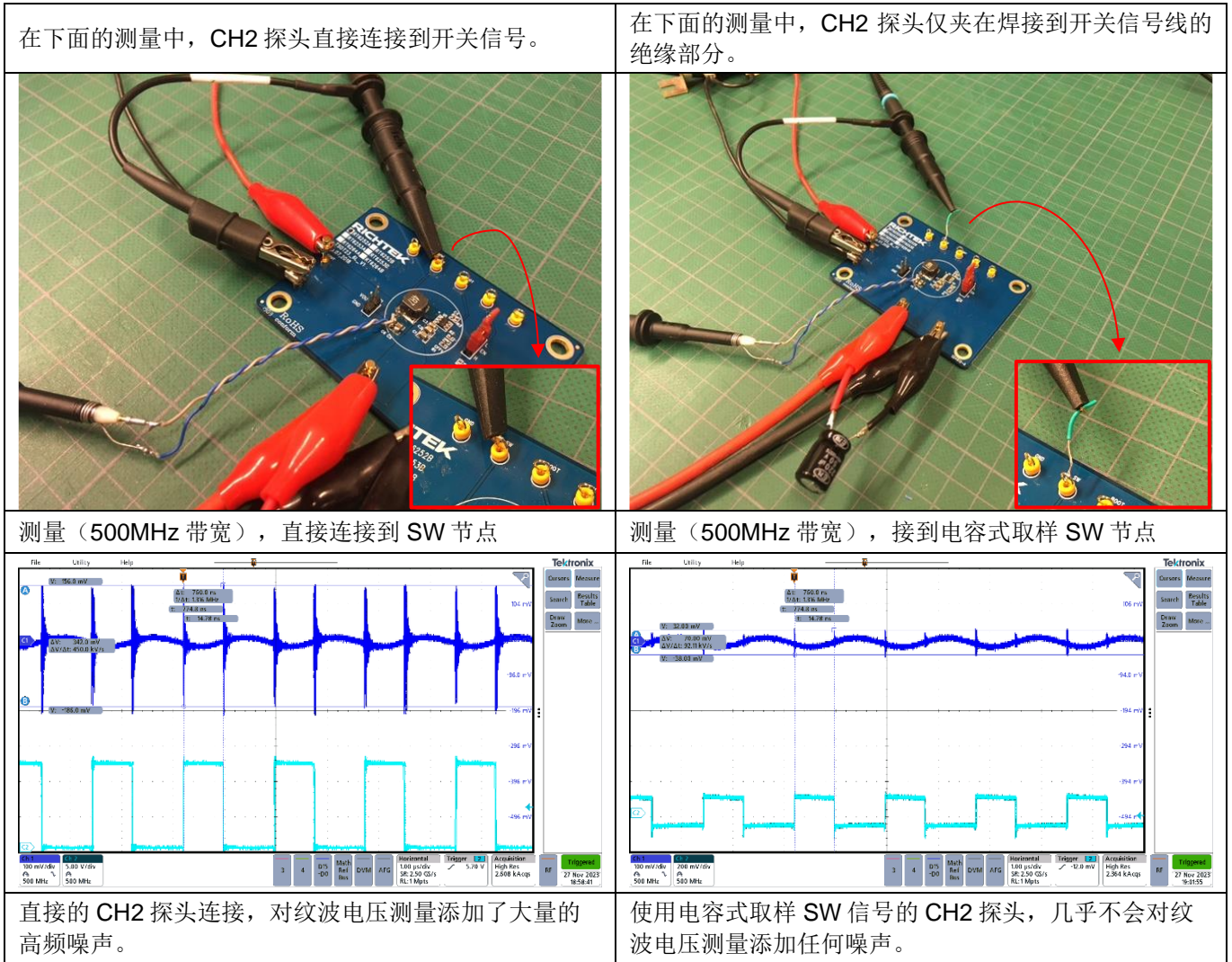


图 22

从测量比较中可以清楚地看出，直接用探头连接，加上带有很大的接地回圈会对测量增加大量杂讯。而电容式取样方法几乎不会增加任何杂讯。电容式取样的量，可以透过改变探头夹与绝缘电线铜芯的距离来调整。

在高频宽设置中进行测量的最佳方法，就是尽可能减少连接设备到 DUT，只连接（电阻）负载和只连接 CH1 探头即可（见图 23 左侧）。然而，如果需要查看开关波形（例如用于示波器触发），电容式取样方法对高频读取的影响会较小。

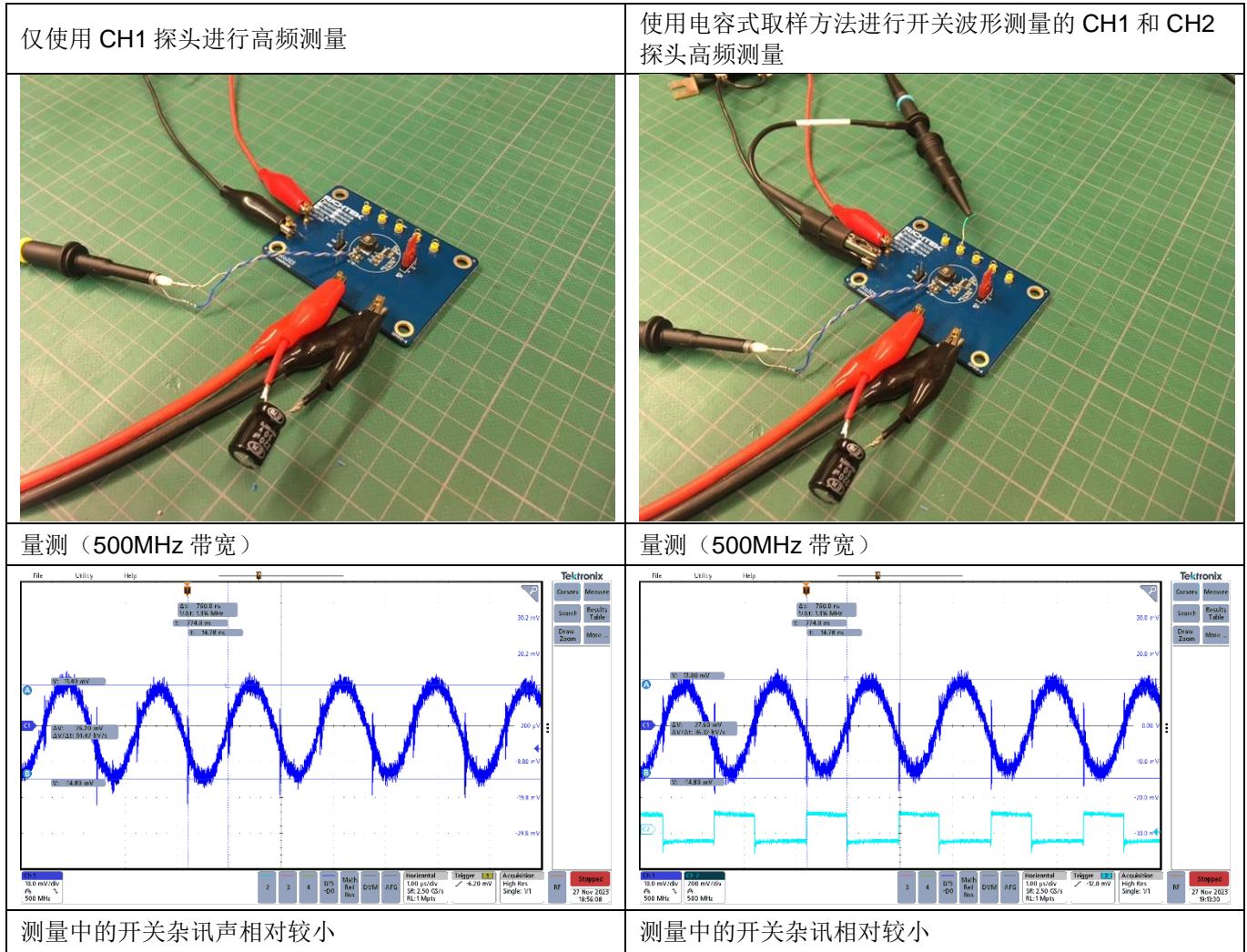


图 23

上述纹波测量中的高频尖峰振幅小于模拟结果。最有可能的是，模拟中显示的非常快速 (50psec) 的信号受到示波器和探头的 500MHz 带宽限制的衰减。

7.5 PSM 纹波测量:

我们可以移除电阻负载以实现低负载的 PSM 操作，并以与 CCM 模式纹波测量相同的方式来测量输出纹波。我们使用扭转电线方法进行纹波测量，使用电容式取样方法进行开关波形测量，参见图 24。

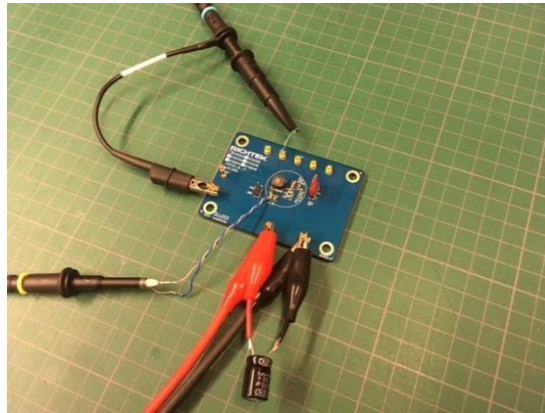


图 24

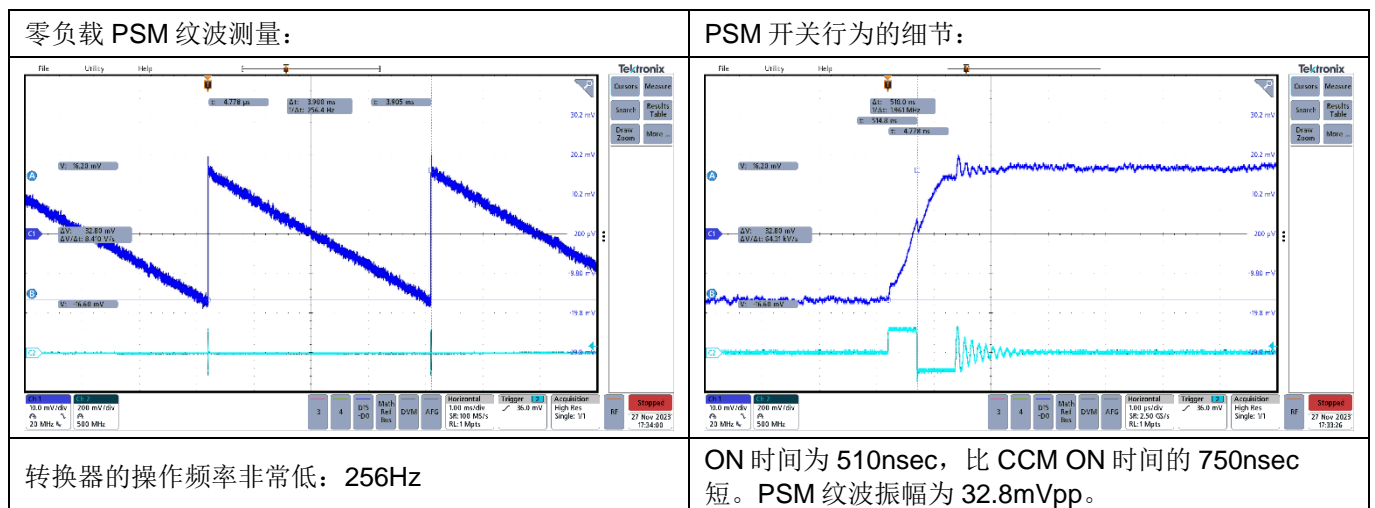


图 25

[RT6252A](#) 的一个特点是，在 PSM 模式下它减小了 ON 时间，以减小 PSM 纹波振幅。

在 PSM 模式期间计算的输出电压纹波 $\Delta V_{OUT\ pp} = \frac{T_{ON}^2}{2LC_{OUT}} \left(\frac{V_{IN}^2}{V_{OUT}} - V_{IN} \right)$ 为 33.2mVpp，因此，测得的纹波为 28.8mVpp，与计算结果相当吻合。

8 实际案例 2: RT5760A ACOT® 降压转换器, 应用于 5V 到 1.2V, 1A, 小尺寸, 低纹波应用

RT5760A 是一款成本效益高的 6V 额定电压, 第三代低压 ACOT 降压转换器, 具有 1A 的输出电流能力和轻载时的自动 PSM 模式。2.2MHz 的开关频率、SOT563 封装和使用小型主要组件, 使得总应用电路面积非常小。电路板的线路图和布局如图 26 所示。

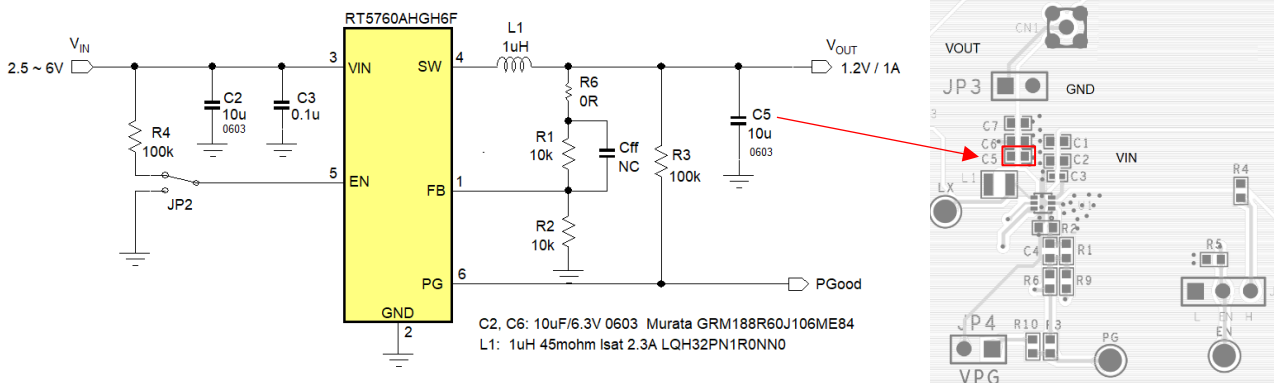


图 26

在这个小型线路布局中, 单一的 MLCC 输出电容 C5 位于非常靠近电感的位置, 该电感是 Murata 的半屏蔽型 LQH32 类型。10μF/6.3V 0603 MLCC 输出电容在 1.2V DC 偏压下, 会下降到 8.6μF, 在低交流电压纹波下可能再下降 10%。这个电容的 ESR 为 3mΩ, ESL 约为 0.2nH (见图 27)。对于这个应用的计算, 我们使用 8μF 的有效电容, 3mΩ 的 ESR 和 0.2nH 的 ESL。

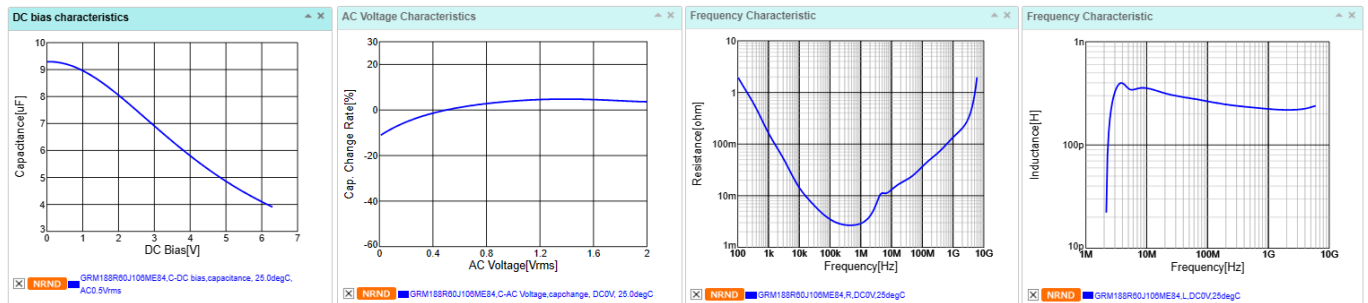


图 27

1μH 2.3A 电感 LQH32PN1R0NN0 的自共振频率为 150MHz, 因此 C-parallel 为 1.1pF。

$$\text{电感纹波电流 } \Delta I_L = \frac{V_{OUT} (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} \cdot F_{SW} \cdot L} \text{ 为 } 0.42\text{App}$$

$$\text{输出电容 CCM 纹波电压 } \Delta C_{OUT} (pp) = \frac{\Delta I_L (pp)}{8 \cdot C_{OUT} \cdot F_{SW}} \text{ 为 } 2.94\text{mVpp}$$

1.5mΩ ESR, 加上 $\Delta C_{OUT \text{ ESR}} (pp) = \Delta I_L (pp) \cdot R_{ESR}$ 的 1.25mVpp, 所以总共 CCM 纹波为 4.19mVpp

对于具有寄生组件的高频行为，下面的 LTSpice 模拟显示了结果：（图 28）

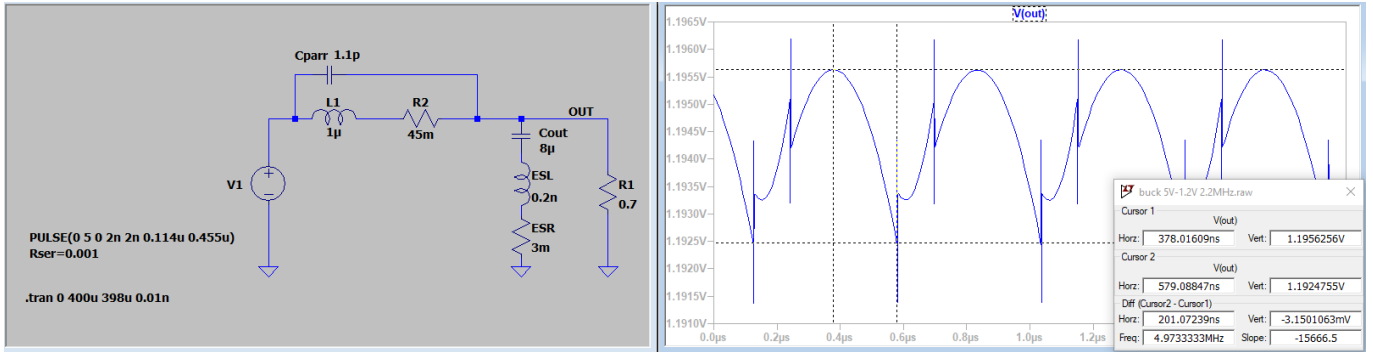


图 28

可以看到，输出波形是抛物线（Cout 电容）、三角波 (Cout ESR)、电压方波 (Cout ESL) 和高频尖峰（由于电感并联电容和 Cout ESL 引起）的组合。

8.1 第一次使用小接地环路的测量:

图 29 显示了使用 PCB 输出电压接头/短接地环探头连接的输出纹波测量（距离单个输出电容 C5 有一定距离，以及用于测量开关波形的电容接收方法）。

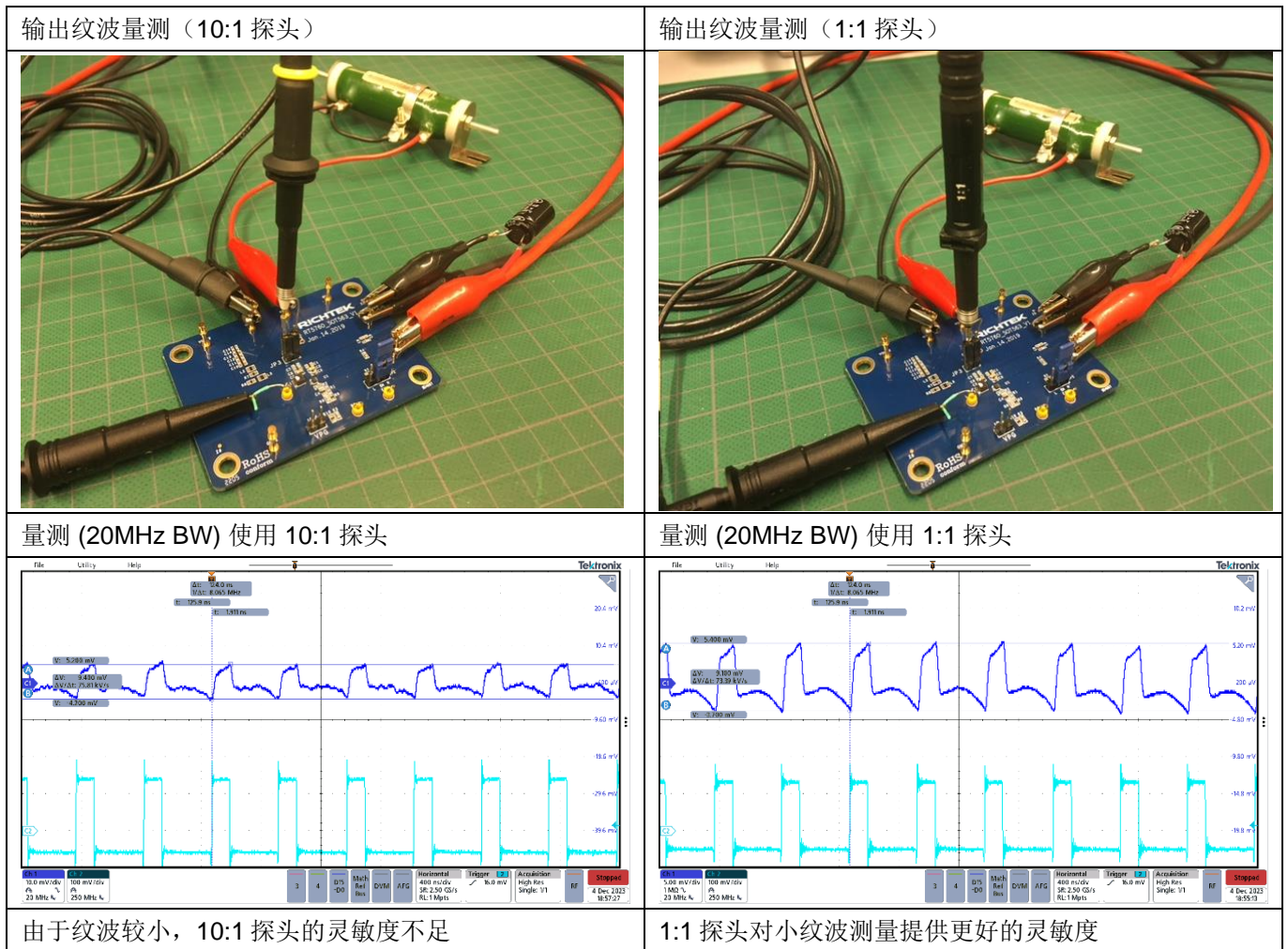


图 29

对于这种非常低的输出电压纹波测量，10:1 探头的灵敏度不足，1:1 探头则提供更好的结果。

同时可以看到，短探头环路连接仍然会吸收相当多的电感寄生场：测量的波形（9.1mVpp，带有较大的电压方波）与模拟和计算的（4.2mVpp）结果非常不同。

8.2 第二次使用扭转线的测量：

图 30 显示了使用 1:1 探头的输出纹波测量，直接连接到 MLCC 输出电容器 C5。扭转线的连接方式使小环路垂直放置，以最小化电感杂散磁场的耦合。

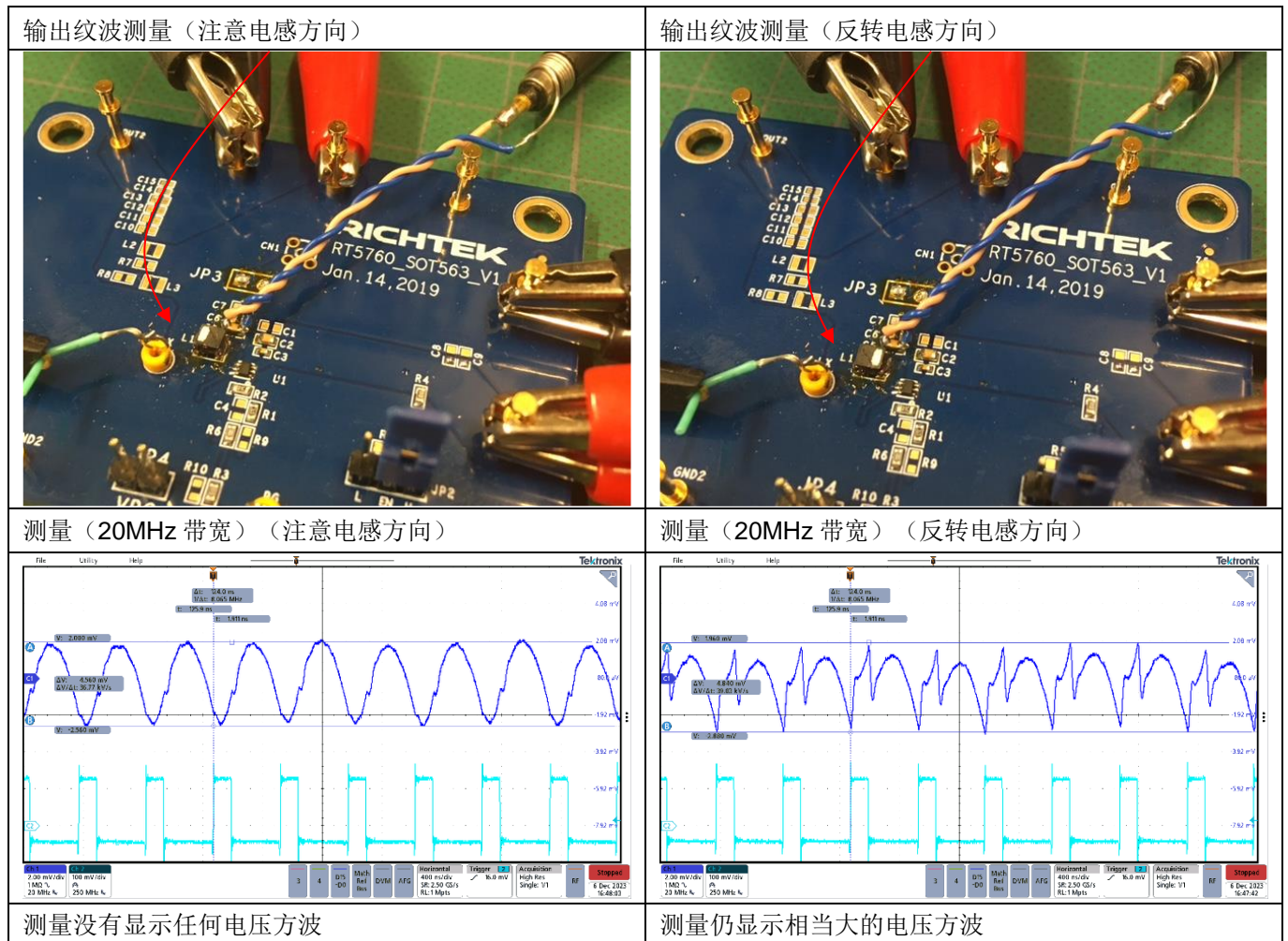


图 30

扭曲的电线连接的环路比之前的接点 + 短接地环路探头连接还要短，但从上面的测量结果可以看出，在反转电感方向时，纹波测量结果仍存在一些差异。因此，由于电感与高频讯号非常近，是很难避免一些电感杂散场杂讯耦合到小的扭转电线中。为了减少电感杂散场的影响，我们可以尝试移动输出电容来远离电感。

8.3 第三次使用扭转电线进行测量，并将电容移离电感

图 31 显示了使用扭转电线进行的纹波测量，并将输出电容移离电感 8mm 的位置：

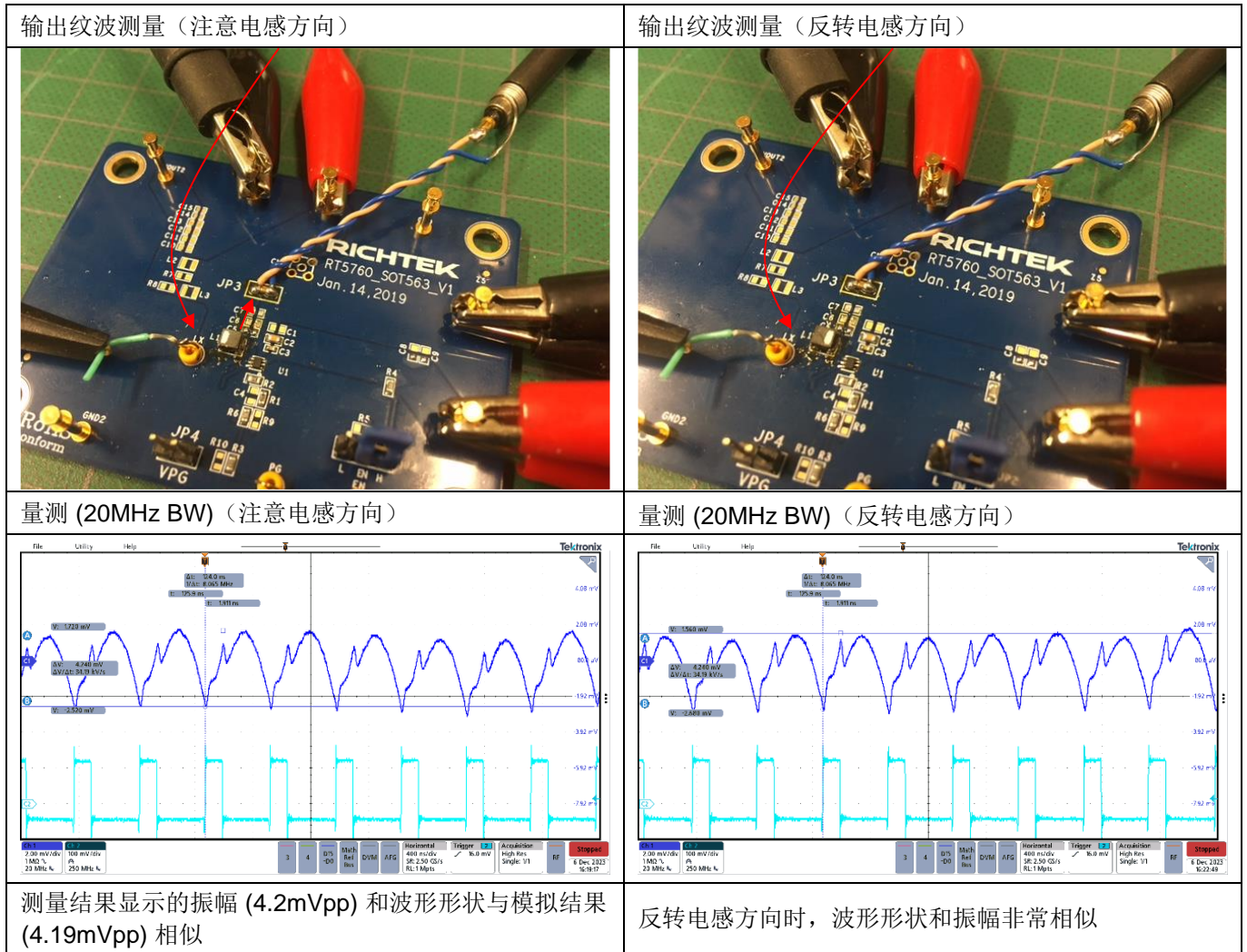


图 31

使用扭曲的线连接和将输出电容移离电感 8mm 后，现在纹波测量结果与两种电感方向的计算和模拟相符合。请注意，ACOT[®]转换器仍存在一些频率抖动（OFF 时间变化），这导致测得的纹波振幅出现一些不规则性。

输出纹波测量使用 1:1 探头和 500MHz 示波器带宽设置，以及电容接收法进行开关波形测量（见图 32）：

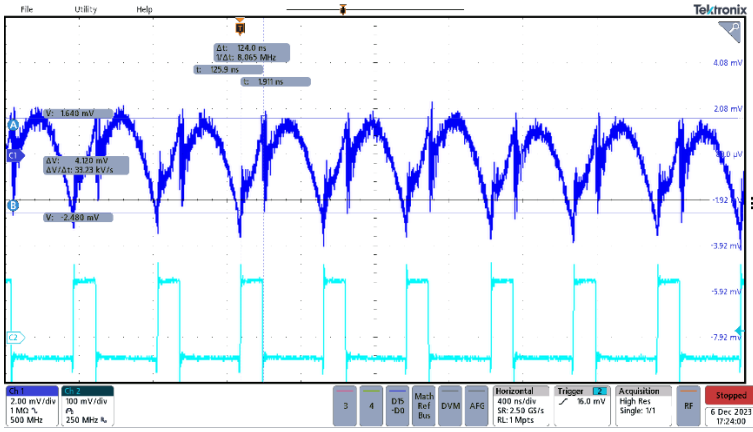


图 32

可以看到，使用高带宽设置的示波器进行测量，结果并未显示太多额外的高频尖峰。这主要与 1:1 探头有关，其有效带宽为 15MHz。大多数 1:1 探头的带宽相对较低，因此它们实际上不能显示高频信号。

8.4 PSM 测量:

对于 [RT5760A](#) EVB 板上的 PSM 纹波测量，我们移除负载电阻，并使用与 CCM 模式纹波测量相同的方式来测量输出纹波（用于纹波测量的扭转线方法和用于开关波形测量的电容式取样法），参见图 33。

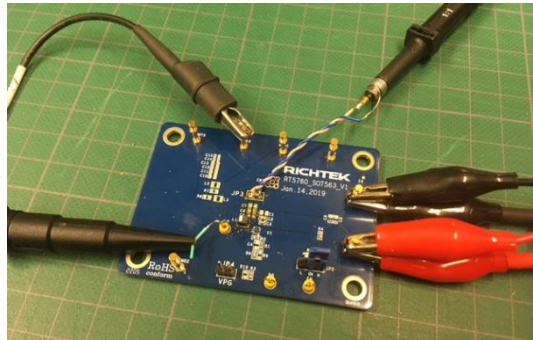


图 33

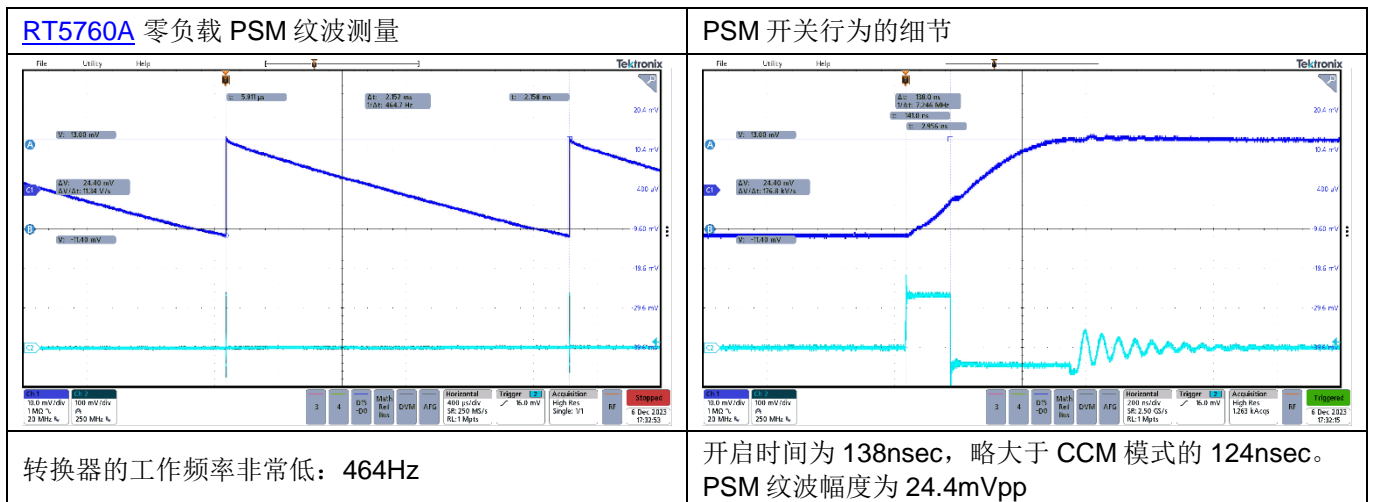


图 34

在 PSM 模式下计算的输出电压纹波为 $\Delta V_{OUT\ pp} = \frac{T_{ON}^2}{2LC_{OUT}} (V_{IN}^2 - V_{OUT}^2)$ 为 29.4mVpp，因此测得的纹波为 24.4mVpp，与计算结果相差不远。

9 DC-DC 转换器增益相位测量设置技巧

电源转换器控制回路增益相位测量，可以通过将正弦波小信号输入回授网络，并测量转换器输出端插入点两侧的正弦波纹波幅度和相位来进行。（见图 35）。

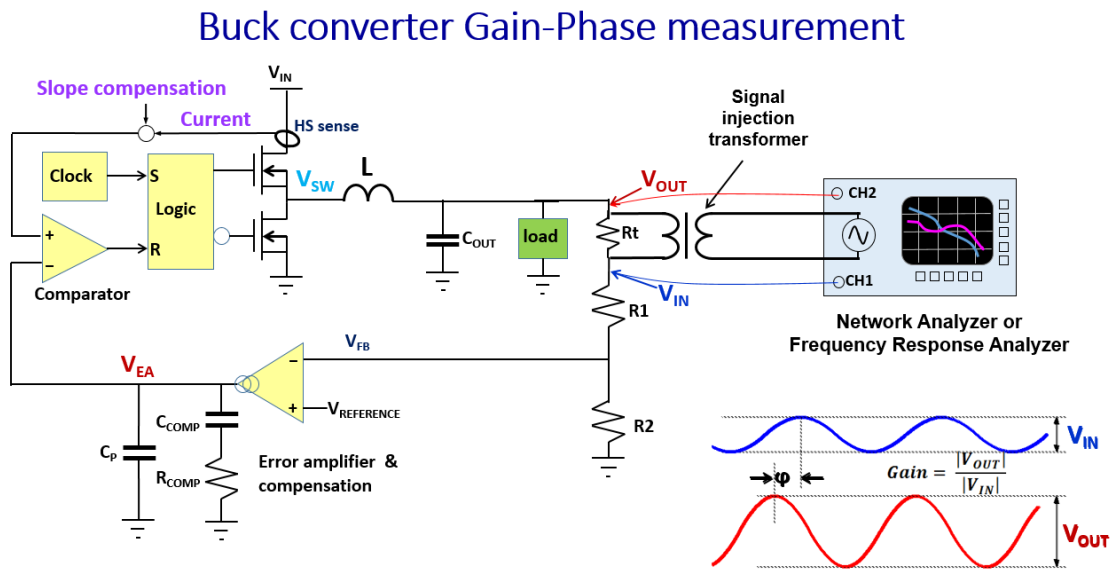


图 35

正弦波小信号的振幅必须尽量保持较小，以避免改变电源转换器的操作工作点，因此在测量点的正弦波信号幅度也会相当小。为了获得准确的增益相位测量结果，测量应具有高灵敏度，并且所测得的信号应具有低开关杂讯噪声。因此，先前讨论的输出纹波测量方法也可应用于增益相位测量。

在进行增益相位测量时，扭转线方法非常有用：灵敏的测量点须远离开关转换器，信号输入变压器引线、CH1 探头和 CH2 探头都可以方便地连接到扭转的线端，离 PCB 也要有一定的距离（见图 36）。

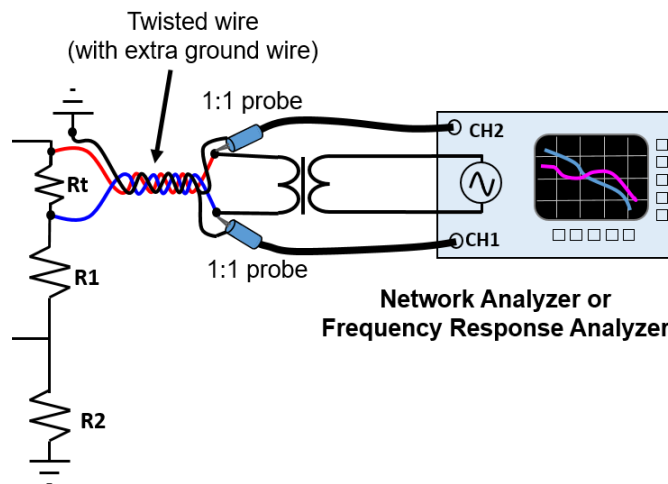


图 36

10 实用增益相位测量范例

图 37 显示了 [RT6363GQW](#) 60V/3A 降压转换器在 24V 至 5V/3A 应用中的增益相位测量设置。

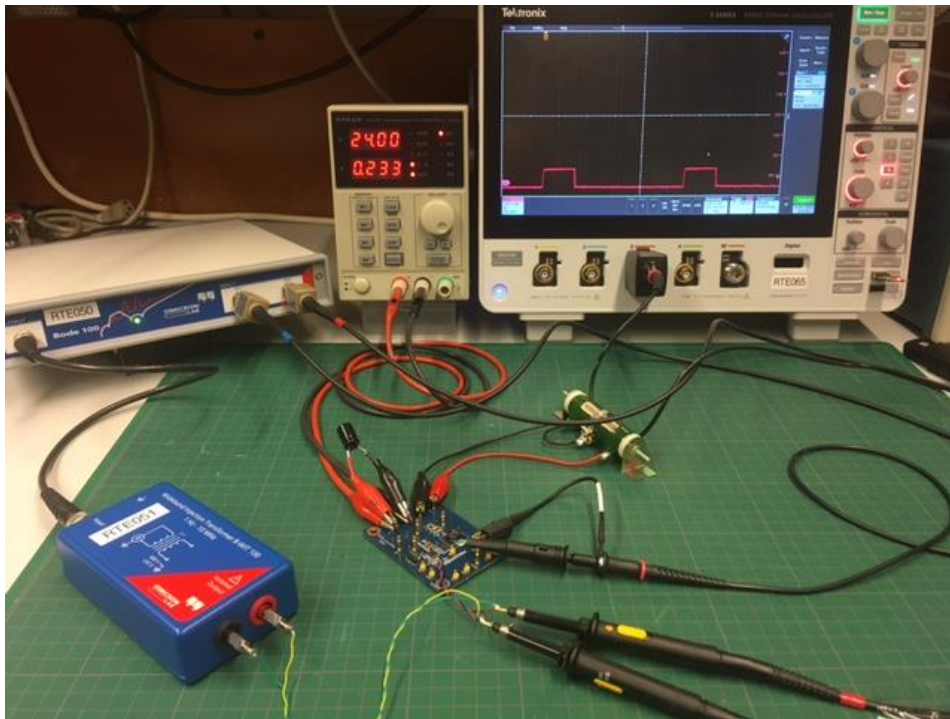


图 37

[RT6363GQW](#) 是一个额定电压为 60V/3A 的电流模式降压转换器，通常应用于工业领域。在这个 24V 到 5V/3A 的应用中，切换频率设定为 1MHz，并搭配 24 μ F 的有效输出电容，外部补偿设定为 60kHz 的交叉频率。为了进行增益相位的测量，增加了一个 1.7A 的电阻性负载以确保连续导通模式的运作。在回授网络的顶部插入了一个 4.7 Ω 的电阻，正弦波小信号通过这个电阻作输入。图 38 显示其电路图。

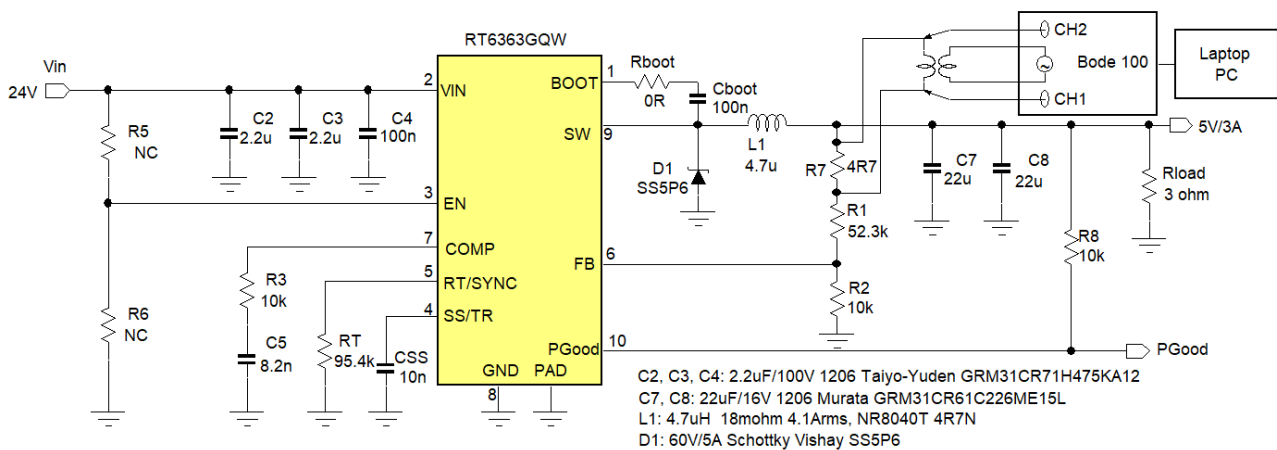


图 38

为了最小化测量中的杂讯， 4.7Ω 电阻的测量点与接地线连接在一起，同时连接到靠近回授网路的一个干净的小信号地线。插入变压器和两个 1:1 的探头连接到扭转线的另一侧。见图 39。

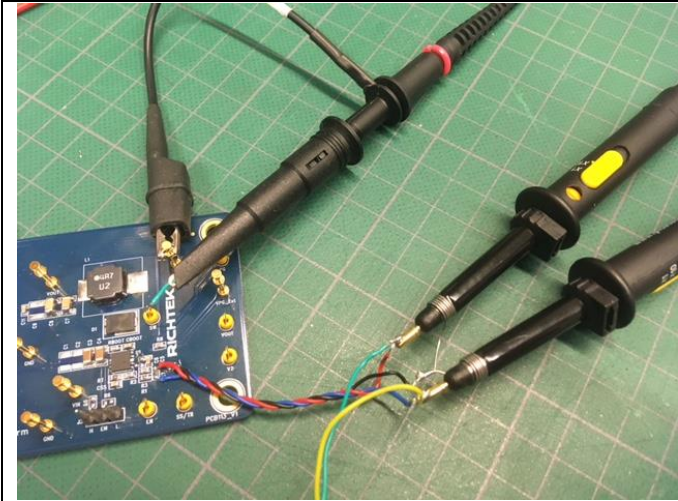
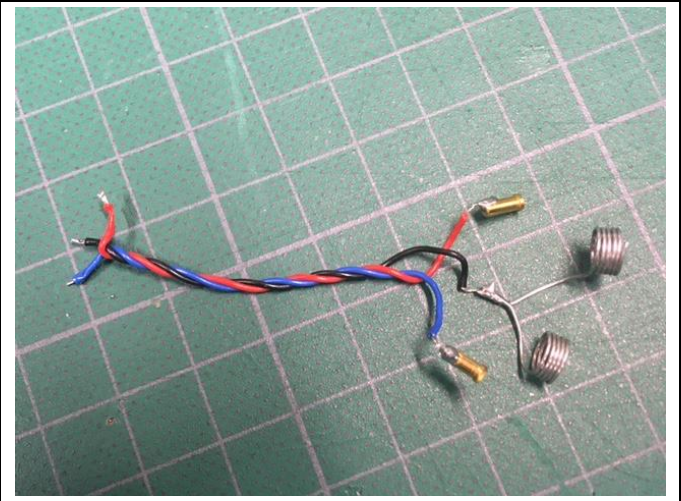
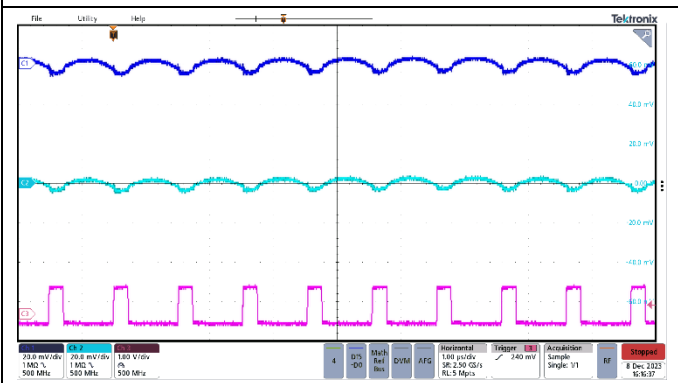
<p>1:1 探头连接的细节。使用电容式取样方法来测量切换信号。</p>	<p>扭转线的细节。地线连接到靠近回授网路的 EVB 小信号地线。</p>
	
<p>以下是 CH1 和 CH2 的测量信号，其纹波较低且杂讯非常少。</p>	
	<p>在增益相位正弦波扫描测量期间，观察示波器上的切换信号占空比变化是一种很好的实践方法。</p>

图 39

在进行切换转换器的增益相位测量时，插入的正弦波小信号应该保持较小，以避免非线性转换器行为（例如 PSM 模式或占空比限制）。在低频率情况下，回路增益较大，插入信号也可以较大以达到足够的低频敏感度，但在转换器 LC 频率以上，插入信号必须保持较小，特别是在交叉频率附近。大多数增益相位分析仪都具有可调节输入信号振幅的功能。

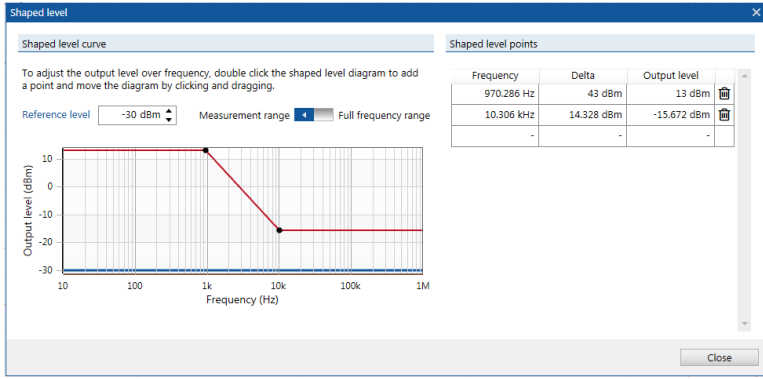


图 40

图 40 显示了 BODE-100 分析仪的图形选单。在 1kHz 以下的扫描频率，振幅被最大化，但必须检查小信号输入变压器时，在低频时是否会饱和。这可以通过检查小信号正弦波形状来完成。

在 1kHz 以上，振幅降低。10kHz 以上的正弦波被设置为固定的低振幅。可以通过观察交叉频率附近的切换信号占空比变化来检查确切的振幅。

以下的测量显示了加上 60kHz 输入信号的 CH1 和 CH2 信号输出。信号的振幅将影响切换信号的占空比变化。我们设定了 19mVpp 的插入信号振幅。由于信号中的杂讯较低，信号杂讯比例看起来是正常的。

以下的测量显示了加上 19mVpp 插入信号振幅时，占空比的变化。占空比的变化很小，因此没有出现转换器任何非线性结果的风险。

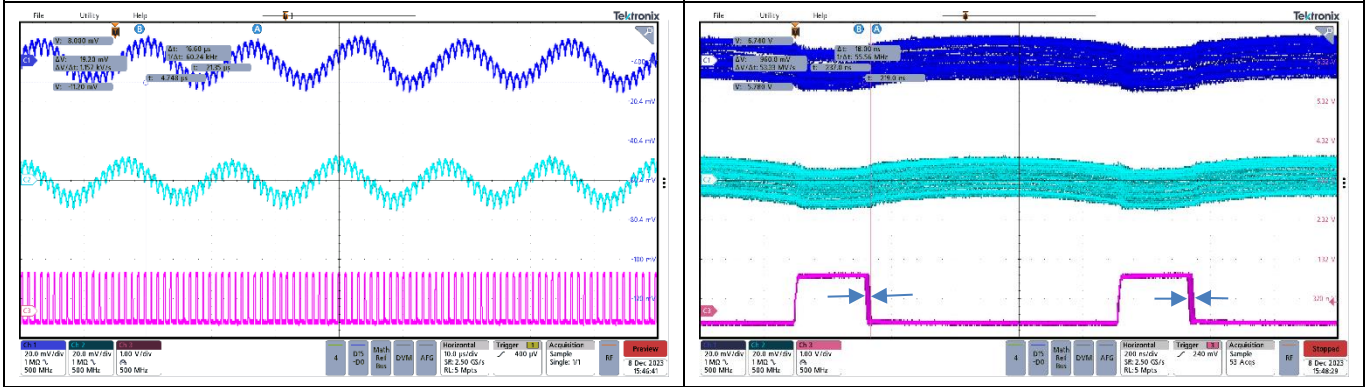


图 41

图 42 显示了增益相位测量的结果。曲线平滑，没有显示出奇怪的行为。交叉频率为 59kHz（接近 60kHz 的目标值），相位裕度为 63 度。

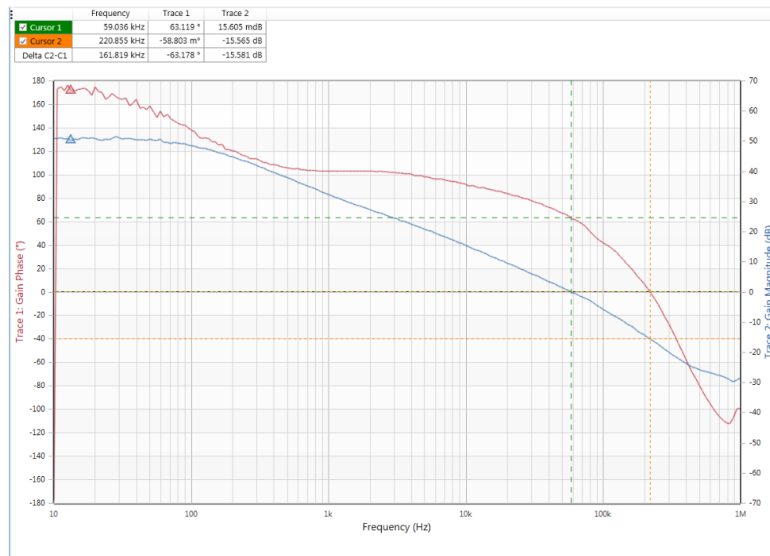


图 42

10.1 使用长地线进行的第二次测量:

为了显示在使用带有长地线的探头连接时会发生什么，图 43 显示了测量设置，其中 CH1 和 CH2 的 1:1 探头使用长地线和夹子连接。切换信号也是通过直接将 10:1 探头（带有红色）环直接连接到切换信号来测量，这样的方式会增加额外的杂讯。

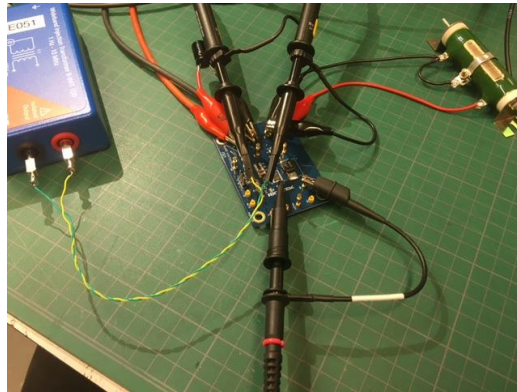


图 43

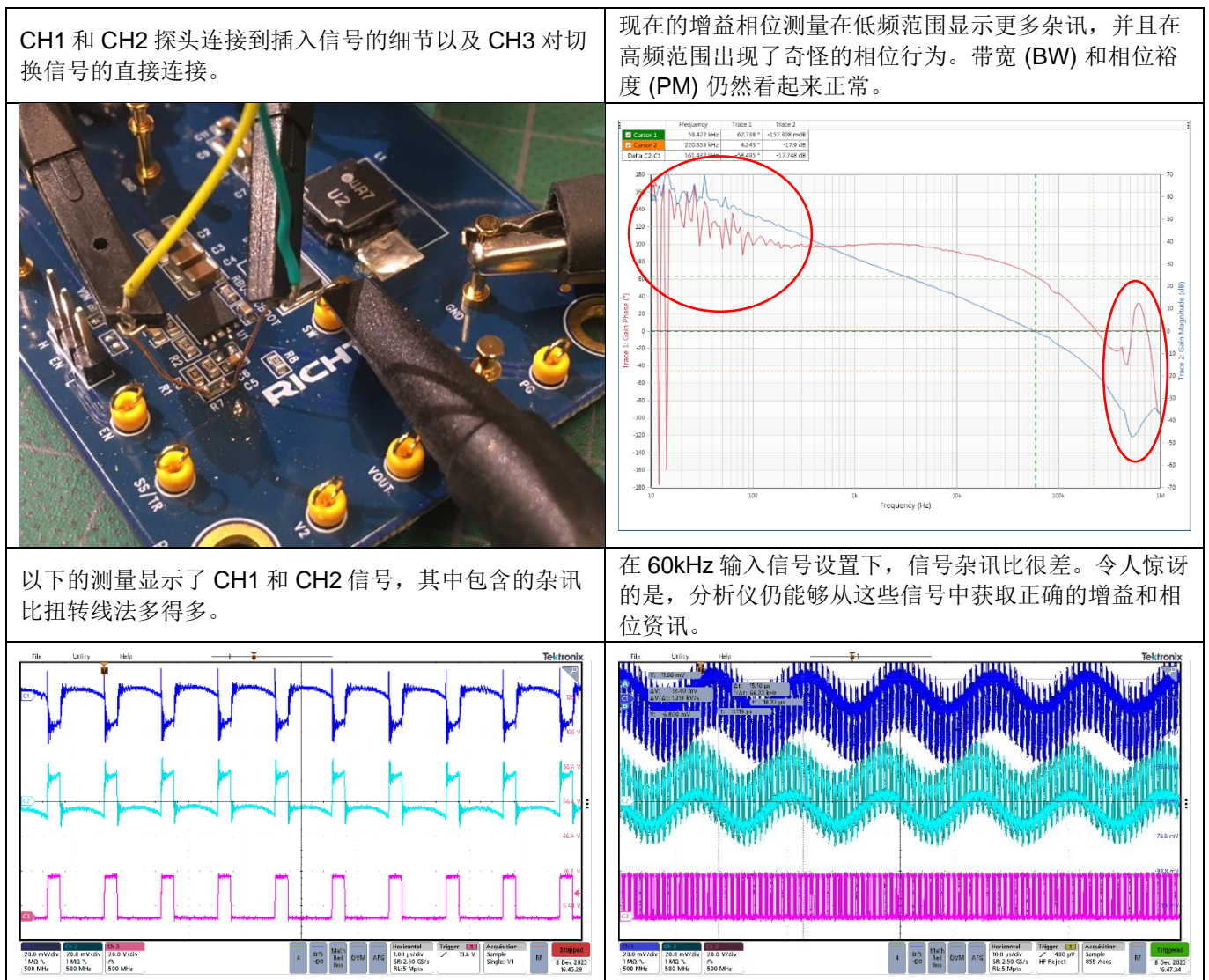


图 44

11 总结/实用建议

测量回路最小化

在测量 DC-DC 转换器输出电压纹波时，测量回路面积在杂讯收集中发挥重要作用。始终将探头连接回路面积最小化。使用[尖端和桶式方法](#)或扭转线方法可以减少杂讯的接收。通过改变电感方向来检查电感杂散磁场的影响。

避免将杂讯添加到测量中

直接将探头连接到快速切换波形可能会增加大量高频杂讯。使用非常短的地线或使用电容式取样来检查切换信号可以将高频杂讯降到最低。

设定可接受的示波器取样频宽

由转换器输出纹波引起的杂讯，对不同敏感性负载的应用可能有所不同。对于对杂讯敏感的应用，例如高分辨率类比分位数转换器 (ADC) 或音频应用，建议在全频宽下测量输出纹波，而对于对杂讯不敏感的应用，可以选择 20MHz 的取样频宽。请注意，仍然需要在完整示波器取样频宽下检查背景杂讯，以防输出纹波被不准确地测量。

在运行增益相位分析之前在时域中检查信号

在增益-相位测量中，将信号连接到频率响应分析仪之前，必需检查示波器上测得的信号。尽量减少信号中的杂讯以获得最佳量测结果。

有关增益-相位量测的实际范例，请观看视频 <https://www.youtube.com/watch?v=YHCQ0GDlw6Q>

若要获得更多产品的产品信息，请[订阅我们的电子报](#)。

Richtek Technology Corporation

14F, No. 8, Tai Yuen 1st Street, Chupei City

Hsinchu, Taiwan, R.O.C.

Tel: 886-3-5526789

Richtek products are sold by description only. Richtek reserves the right to change the circuitry and/or specifications without notice at any time. Customers should obtain the latest relevant information and data sheets before placing orders and should verify that such information is current and complete. Richtek cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Richtek product. Information furnished by Richtek is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Richtek or its subsidiaries for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Richtek or its subsidiaries.