



引言

LCR 表和阻抗分析仪用于测量无源器件，如电阻器、电容器、电感器或这些元件的组未知值。这些实验室器件是相似的，只是阻抗分析仪允许在不同的测试频率下进行测量。与其他架构相比，自动平衡 (ABB) 方法可在广泛的阻抗值范围内提供较高的测量精度，本技术报告对此进行了讨论。

自动平衡方法

图 1 展示了使用 ABB 方法的模拟前端的代表性示意图。Z_{DUT} 是未知阻抗 (受测器件或 DUT)，R_F 是该电路中的已知反馈电阻。在信号链的输入端强制施加已知电压 V_{IN}。对于 Z_{DUT} 两端的电压 V_{DUT} 和流经它的电流 I_{DUT}，

$$Z_{DUT} \angle \theta_Z = \frac{V_{DUT} \angle \theta_V}{I_{DUT} \angle \theta_I} \quad (1)$$

放大器 A1 用作反相放大器，其输出电压为：

$$V_O = -R_F I_{DUT} \quad (2)$$

$$\Rightarrow I_{DUT} = \frac{-V_O}{R_F} \quad (3)$$

根据 (1) 和 (3)，由以下公式得出未知阻抗 Z_{DUT}：

$$Z_{DUT} = \frac{V_{DUT}}{\left(\frac{-V_O}{R_F}\right)}$$

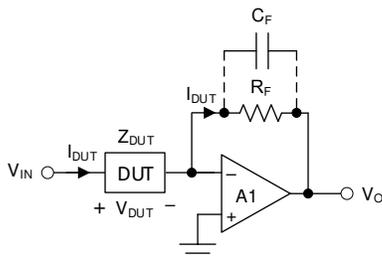


图 1. 使用 ABB 方法的 LCR 表模拟前端的代表性示意图

设计挑战

使用 ABB 方法设计 LCR 表模拟前端电路时，需要仔细考虑以下几点：

1. 单个 R_F 值不足以测量广泛的 Z_{DUT} 值。为了增加 LCR 表的测量范围和灵敏度，多个反馈电阻器 (R_{F1、2、3}) 通过串联开关 (SW_{F1、2、3}) 切入到电路中，如图 2 所示。
2. 较大的 R_F 值会在噪声增益传递函数中形成零点，导致 40dB/十倍频程的接近速率和潜在的不稳定性。使用与较大 R_F 并联的电容器 C_F (如图 1 所示) 可引入一个极点来抵消该零点并恢复相位裕度，但很难找到一个单一的 C_F 值来保证所有容性 Z_{DUT} 值的稳定性。该问题可以使用带有 Z_{DUT} 的串联电阻器 R_{G1、2、3} 来解决，如图 2 所示。使用 R_G 会在噪声增益中引入一个极点，从而消除零点并恢复稳定电路的相位。需要使用多个 R_G 值 (等于对应的 R_{F1、2、3}) 和对应的串联开关 (SW_{G1、2、3})。相同的 R_F 和 R_G 对 (在图 2 中以相同颜色标记) 每次都切换到所需的测量范围，以确保稳定运行。
3. 对于高值 DUT 的高精度测量，V_{DUT} 和 I_{DUT} 应使用高 Z 输入放大器 (此处为 A2 和 A3，具有 ≈pA 范围偏置电流的 CMOS 或 FET 输入放大器) 进行缓冲。

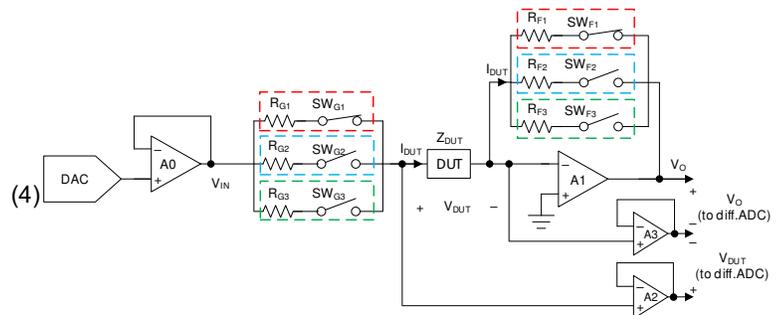


图 2. 用于需要更多放大器和差分 ADC 的高频测量的改进电路

放大器 A3 可以取消，以简化模拟前端设计；但是，为保持测量精度，放大器 A1 应具有足够大的开环增益 (AOL)，从而得到所测最高测量频率处的增益带宽积。在测试频率下 AOL 较大时，A1 的反相输入端会保持虚拟接地。

取消 A3 后可以单点接地参考测量，而且只需较少数量的放大器通道和单端 ADC。一般经验法则是，确保 A1 在所测最高频率处具有 >60dB 的 AOL，以进行高精度测量。对于更高的测试频率，需要对 V_{DUT} 和 I_{DUT} 进行两点测量，以高精度计算 Z_{DUT} ，这需要更多放大器（图 2 中为 A3）和差分输入 ADC。

结论

[TIDA-060029](#) 参考设计详细描述了此 LCR 表模拟前端和相关困难。此参考设计中实现了阻抗测量精度为 0.1% 的模拟前端。在 100Hz 到 100kHz 的频率下，可以测量 1Ω 到 $10M\Omega$ 范围内的阻抗值。表 1 列出了适用于 LCR 表设计的德州仪器 (TI) 放大器：

表 1. 推荐用于 LCR 表设计的放大器

器件	架构	GBW	静态电流	噪声	函数
OPA810	FET 输入、电压反馈	70MHz	3.7mA	6.3nV/rtHz	用于 V_{DUT} 和 I_{DUT} 测量的单位增益缓冲器
OPA656	FET 输入、电压反馈	230 MHz	14mA	7nV/rtHz	高频 V_{DUT} 和 I_{DUT} 测量
THS4551	低功耗全差分放大器	135MHz	1.37 mA	3.3nV/rtHz	用于差分 V_{DUT} 和 I_{DUT} 测量的 ADC 输入驱动器
BUF634A	高 I_{OUT} 缓冲器	210 MHz	8.5 mA	3.4nV/rtHz	用于以 V_{IN} 驱动低值 DUT 的高 I_{OUT} 缓冲器

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司