

利用 SPICE 分析理解心电图前端中的右腿驱动

心电图（ECG）学是一门将心脏离子去极（ionic depolarization）后转换为分析用可测量电信号的科学。模拟电子接口到电极/患者设计中最为常见的难题之一便是优化右腿驱动（RLD），其目的是实现较高的共模性能和稳定性。利用 SPICE 分析，可大大简化这一设计过程。

在 ECG 前端中，RLD 放大器具有 V_{ref} 的共模电极偏置，并反馈经过反相处理的共模噪声信号（ e_{noise_cm} ），以降低测量放大器增益级输入端总噪声。图 1 中，源 ECG_p 和 ECG_n 被分离开，目的是表明 RLD 放大器如何为一部分 ECG 信号提供共模参考点，而这部分 ECG 信号可在测量放大器（INA）的正负输入端看到。左臂、右臂和右腿的并联 RC 组合，代表了集总无源电极连接阻抗（本文后面部分以 $52k\Omega$ 和 $47nf$ 表示）。假设 e_{noise_cm} 以寄生方式耦合至输入，则 e_{noise_cm} 的反馈会降低每个输入端的总噪声信号，并使用外部方法过滤剩余噪声，或者利用测量放大器的共模抑制比（CMRR）来对其进行抑制。

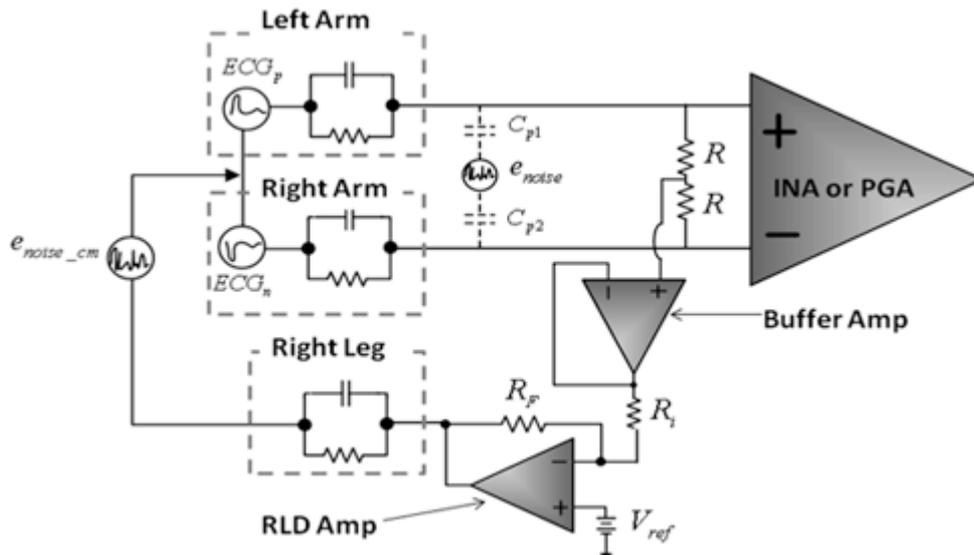


图 1 LEAD I 和 RLD 简易连接

在图 2、3 和 4 中，我们可以看到共模抑制变化情况，表明共模测试电路具有不同的 RLD 放大器增益。这些图表明，无反馈电阻器（即增益无限）时达到最佳低频 CMRR；但是，在现实世界中，对于那些要求在某条输入放大器引线被拔掉后 RLD 放大器仍能线性运行的应用来说，去除 DC 通路和/或将 R_f 设置为某个高值或许并不实际。

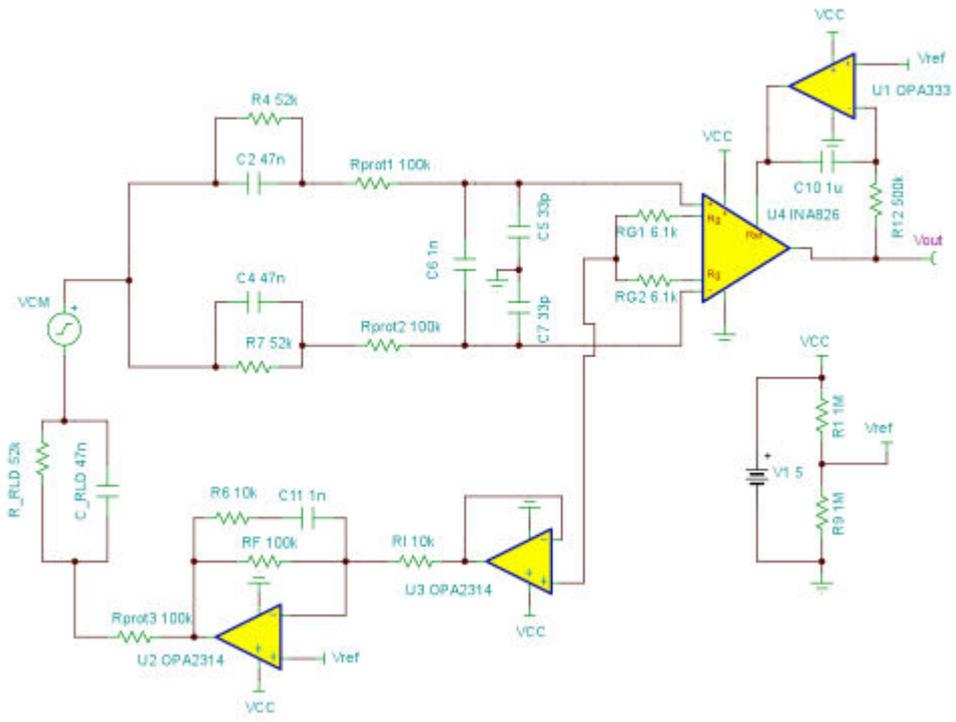


图 2 CMRR 与 RLD 增益的关系

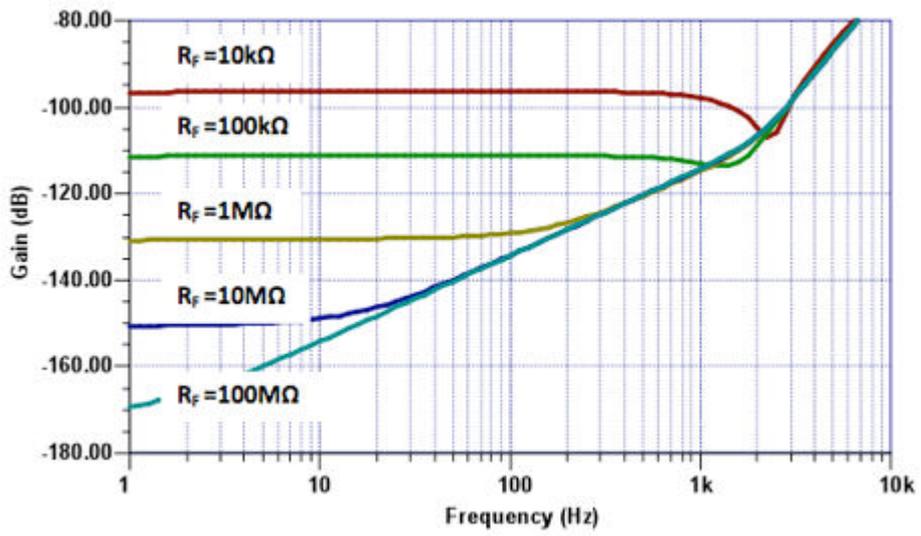


图 3 CMRR 图与频率和 RLD 增益 (RF) 的关系

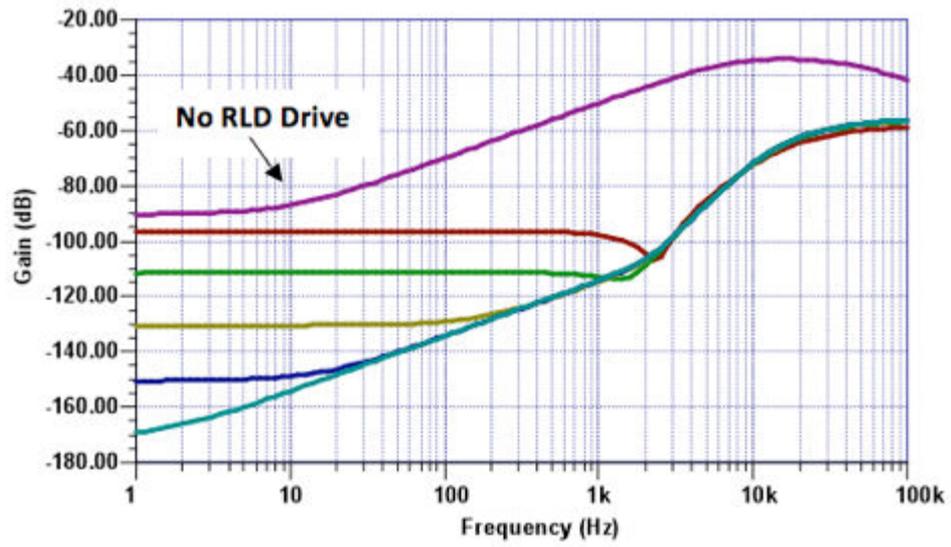


图 4 MCRR RLD 与无 RLD 的关系

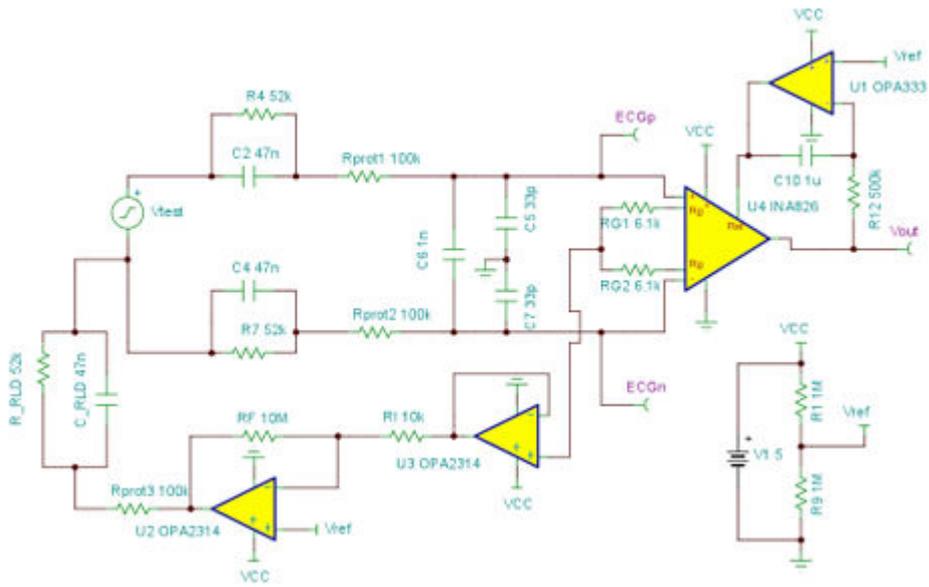


图 5 小信号脉冲测试电路

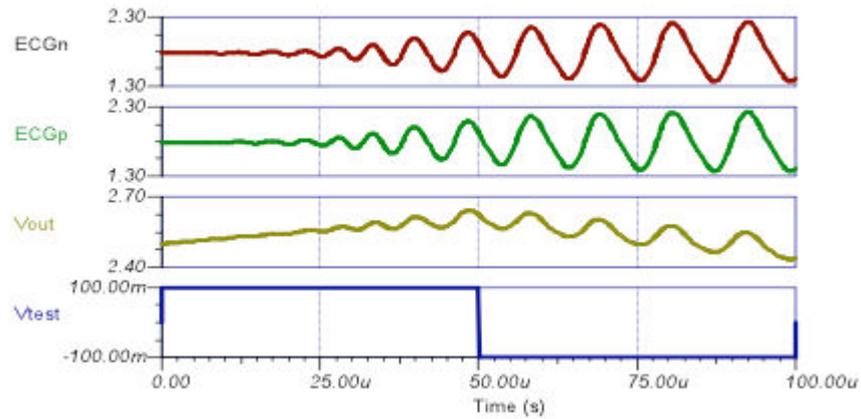


图 6 图 5 输出的曲线图

一旦确定 RLD 放大器的增益，便可使用图 5 所示测试电路，并在环路中注入一个小信号阶跃，然后监视输出响应情况。这时，响应（图 6 所示）显示出强输出振荡，表明环路中出现不稳定性。引起这种不稳定的主要反馈通路是 RLD 放大器周围的身体/电极/测量放大器反馈通路。图 7 所示测试电路，允许在一个波特图上单独分析 RLD 放大器的反馈和开环增益（AOL）曲线图。

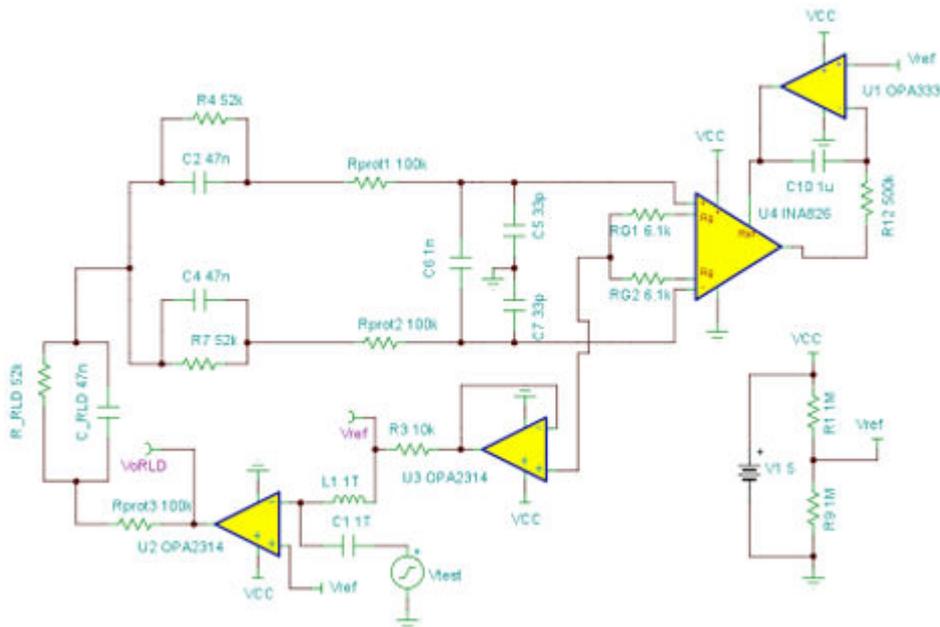


图 7 电极/测量放大器反馈测试电路

图 9 所示 $1/\beta$ （反馈）曲线图代表了图 7 模拟结果。请注意，在没有外部补偿网络时， $1/\beta$ 曲线接近 AOL 曲线，且接近速率（ROC） $>20\text{dB/dec}$ ，其表明存在不稳定性（证明过程，在此不作讨论）。要解决这个问题，需在 RLD 放大器的局部反馈中添加一个串联 R_c 和 C_c （图 9 所示 Z_c ），这样总 $1/\beta$ 便与 AOL 曲线交叉，其接近速率（ROC） $\leq 20\text{dB/dec}$ ，且环路增益相补角 $>45^\circ$ （图 12）。之后， Z_c 成为 20k-30kHz 之间的主要反馈通路。图 11 显示了这种新的、经过补偿之后的 $1/\beta$ 图（基于 R_c 和 C_c 差异）。

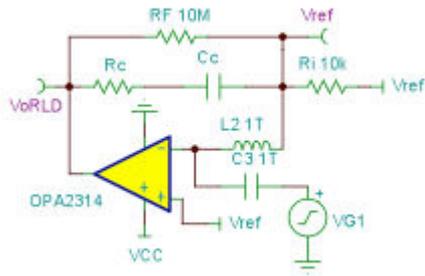


图 8 补偿网络测试电路

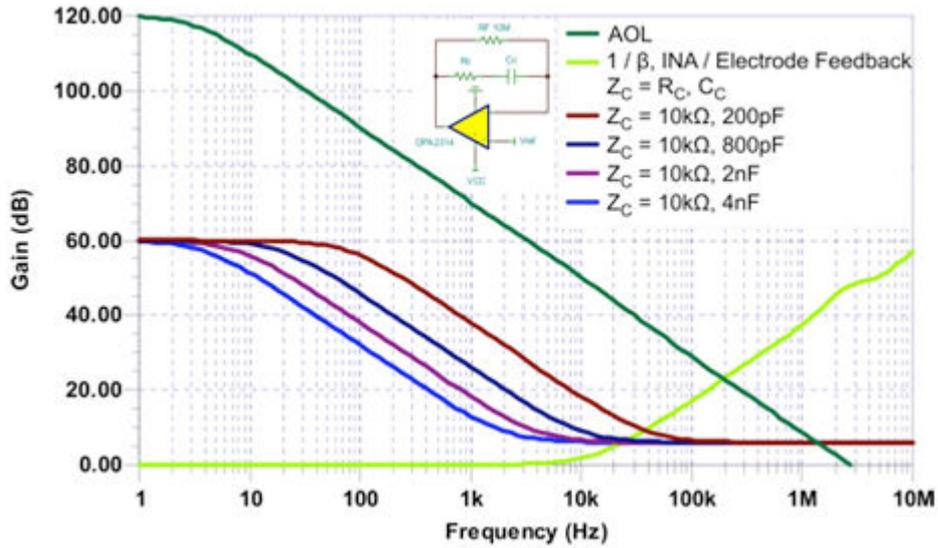


图 9 AOL、 $1/\beta$ 和 Z_c

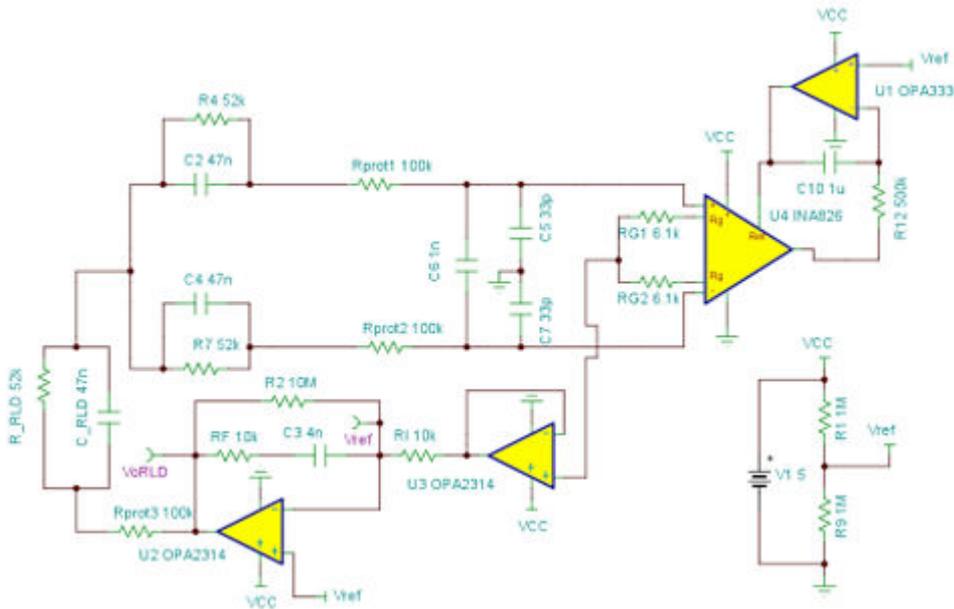


图 10 补偿后的右腿驱动

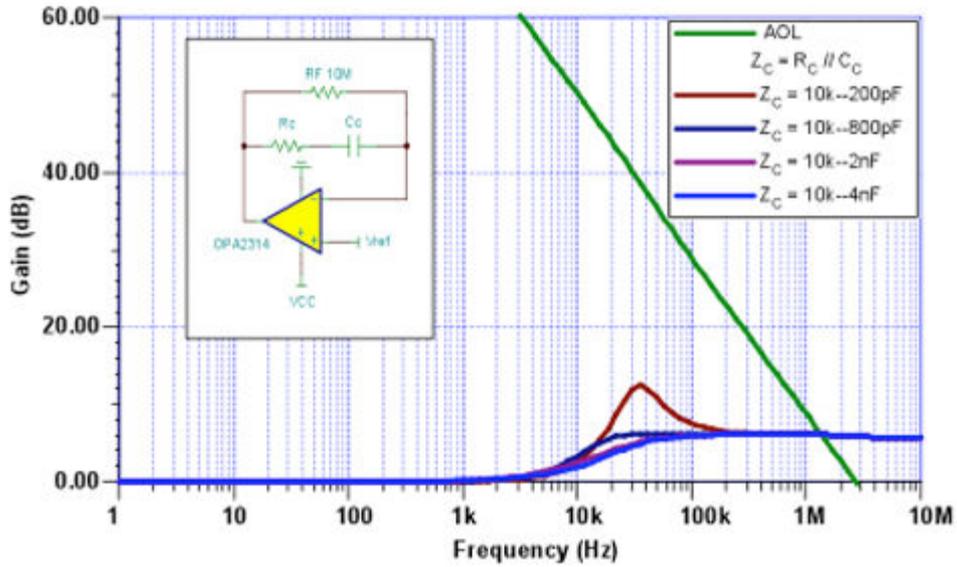


图 11 不同 C_c 值的 AOL 和 $1/\beta$

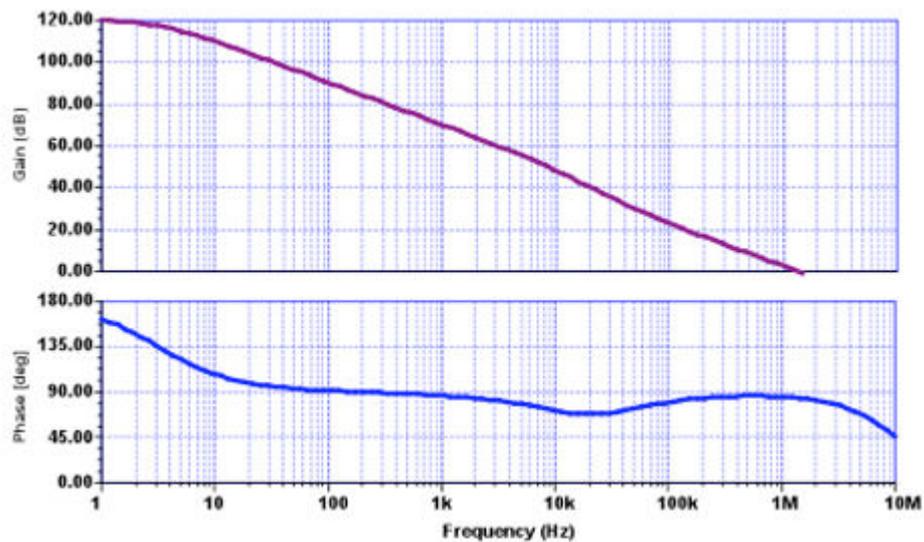


图 12 图 10 的环路增益和相位

总之，SPICE 是一种有效的工具，可帮助快速分析和优化 RLD 前端电路的性能和稳定性。请记住，模型的好坏决定了模拟的质量，因此对一些重要规格建模就十分重要，例如：噪声、AOL、开环 Z_{out} 以及 CMRR 与频率关系等。另外，这项工作应在开始分析和设计以前就完成了。

参考文献

《生物医学设备技术入门》，作者：Brown、John 和 Joseph Carr，美国新泽西州普伦蒂斯·霍尔出版社，1981 和 1993 年。

《心电图简说》，作者：Dubin, Dale，佛特迈尔斯 Cover 出版公司，2000 年。

《运算放大器稳定性第 2 部分（共 15 部分）：运算放大器网络，SPICE 分析》，作者：Green, Timothy。