

# 虚拟网络分析仪在射频电路设计中的应用

王立华

(沧州师范学院 物理与电子信息系 沧州 061001)

**摘要:** 射频电路的设计有很多困难, 电路性能需要综合考虑和优化, 需要反复调整电路结构, 现有的仿真方式不能满足全部要求。以射频 LNA 电路的设计为例, 使用 Multisim 的虚拟网络分析仪进行仿真设计, 包含电路结构、电路稳定性和匹配网路设计, 实际测量结果证明仿真准确度很高。实践表明, 使用虚拟网络分析仪进行 RF 电路设计, 可以降低实验成本, 缩短设计周期, 虚拟网络分析仪在射频电路的教学、实验和研发中, 起着越来越重要的作用。

**关键词:** 射频电路; Multisim; 网络分析仪; 低噪声放大器; Smith 圆图; 阻抗匹配

**中图分类号:** TN98    **文献标识码:** A

## Application of virtual network analyzer in RF circuit design

Wang Lihua

(Department of Physics and Electronic Information, Cangzhou Normal University, Cangzhou 061001)

**Abstract:** RF circuit design is difficult, whose circuit needs to be comprehensive considered and optimized, and its circuit structure needs to be constantly adjusted, but the existing simulation methods can't satisfy all requirements. A design of RF LNA circuit is discussed, for example, Multisim virtual network analyzer is used to simulate and design, which contains circuit structure, circuit stability and network match design. The actual test results show that the simulation is accurate. Practice shows that using virtual network analyzer to design RF circuit can reduce the cost of experiment, and shorten the design cycle, and virtual network analyzer is more and more important in the teaching, test and research of RF circuit.

**Keywords:** RF circuit; Multisim; network analyzer; LNA; smith chart; impedance match

## 0 引言

随着射频(RF)通信技术的发展, 越来越多的RF通信电子产品进入到人们的生活, 射频通信电路的设计也是一个热点, 在射频电路的设计中, 射频前端低噪声放大器(LNA)的设计是一个难点。从天线感应过来的射频信号电流强度在微安级, 而实际电路元器件和使用环境充满噪声干扰, 射频信号很容易淹没在噪声中, LNA的设计应能够放大有用信号, 抑止噪声信号。再有射频信号频率很高, 电路表现出寄生效应<sup>[1]</sup>, 射频电路中的元器件只能作为分布式元器件来考虑, 加大了设计的复杂程度。RF LNA 电路的设计要求低噪声、适当的增益、良好的线性和高稳定性, 要满足所有的性能指标, 设计的电路结构就会相冲突, 设计时不仅要进行复杂的计算, 考虑射频分立元器件或集成电路的选取, 考虑射频电路整体性能的协调, 考虑高速印制电路板(PCB)的设计, 还要依赖于设计者的个人经验进行反复的调整和测试。

所以, RF LNA 的设计需要借助于计算机射频仿真工具, 在理论上进行仿真验证, 然后用实际仪器测量和调整。NI Multisim 是通用的电路仿真设计工具<sup>[2]</sup>, 其中的 RF 仿真模块完全可以用与 RF 电路的设计, 可以利用其中的虚拟频谱分析仪、虚拟网络分析仪和噪声指数分析进行仿真设计。其中的虚拟网络分析仪是效仿现实网络分析仪 HP8751A 的一种虚拟仪表, 使用简单方便, 可以测量 RF 双端口电路的 S 参数、H 参数、Y 参数、Z 参数和稳定因子, 可以测量电路的功率增益、电压增益和输入输出阻抗, 可以进行阻抗匹配网络设计, 支持多种图表显示格式<sup>[3]</sup>。在仿真测量中以 Smith 圆图为辅助工具, 可以在 Smith 圆图中显示电路的 S 参数、Z 参数曲线和稳定性圆图, 直观的显示电路性能, 便于电路结构调整和电路性能的优化。下面以单级共射窄带 RF LNA 电路的设计为例, 讨论 Multisim 的虚拟网络分析仪在设计中的应用。

## 1 电路结构设计

设单级 RF LNA 的设计指标为:电源电压 12 V,射频信号中心频率 1 GHz,带宽为 5%,最小增益为 6 dB,噪声系数小于 3 dB,输出驻波比小于 1.2,信号源阻抗 50,负载阻抗 50。进行设计的第一步是选择合适的晶体管,若设计要求放大器的增益为 G,则应选择在要求的频率范围内满足  $|S_{21}/S_{12}| > G$  的晶体管,并且要求晶体管的噪声系数小于放大器的噪声系数。查询常用射频晶体管的各项参数,选用射频管 MMBR941LT1,MMBR941LT1 是 Motorola 公司生产的低噪声高增益射频小信号放大硅管,稳定性和线性度比较好,其使用手册中该管的典型参数,插入增益为 10~146 dB,最大单向增益为 12~18 dB,正常工作时  $V_{ce} = 6$  V,  $I_c = 5$  mA, 直流电流放大倍数  $h_{fe} = 50 \sim 200$ ;源阻抗 50,  $V_{ce} = 6$  V,  $I_c = 5$  mA,  $f = 1$  GHz 时噪声指数  $NF = 1.9$ ,  $|S_{21}/S_{12}| = 50 > 6$  dB, 符合上述条件<sup>[4]</sup>。单级 RF LNA 采用 NPN 共射放大结构,根据上述参数设计该电路的偏置电路,使得电路工作时有正确的静态工作点,选择  $h_{fe} = 135$ ,  $V_{ce}$  约为电源电压  $V_2$  的一半左右<sup>[5]</sup>, 设  $V_{ce} = 6$  V,  $I_c = 5$  mA, 则  $I_b = I_c/h_{fe}$ , 集电极偏置电阻  $R_1 = (V_2 - V_{ce})/I_c = 1.2$  kΩ, 基极偏置电阻  $R_2 = (V_2 - 0.7)/I_b = 305.1$  kΩ。取 2 个实际电阻  $R_1 = 1.2$  kΩ,  $R_2 = 309$  kΩ, 在 Multisim 中建立以下电路,如图 1 所示,所设计的偏置电阻阻值可以通过静态工作点分析进行精确调整。

为了验证 Multisim 仿真的准确程度,使用虚拟网络分析仪对射频管 MMBR941LT1 的 S 参数进行扫描分析(见

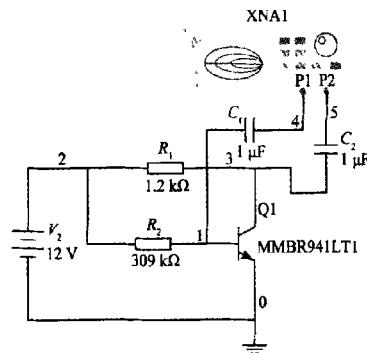


图 1 晶体管 S 参数扫描

图 1),运行仿真并双击打开网络分析仪面板,选测量 S 参数,得到相对于频率的 S 参数曲线,调整频率即可测得各点的 S 参数<sup>[6]</sup>,选取几个频率点,仿真结果见表 1。

对图 1 电路搭建实际电路进行测量,结合该射频管使用手册,获得该电路 S 参数的实际测量值,见表 2。

表 1 和表 2 数据比较说明,虚拟网络分析仪的仿真和实际测量结果比较接近。选择该管的另一个原因,该管的噪声系数小于整体电路要控制的噪声系数,  $NF = 1.9 < 3$  dB,对于 RF LNA 的设计而言,控制噪声是很重要的。噪声主要来源于晶体管,所以应选择低噪声射频管,设计电路时合理选择电路结构,合理调整电路工作状态,有助于缓解噪声指标和电路其它性能指标之间的冲突。在 Multisim 中,可以进行噪声指数分析,本文不作过多的讨论。

表 1 仿真结果

$V_{ce}$ (VV)	$I_c$ (mA)	$f$ (GHz)	$S_{11}$ (Mag/Deg)	$S_{21}$ (Mag/Deg)	$S_{12}$ (Mag/Deg)	$S_{22}$ (Mag/Deg)
6.1	5.0	1.0	0.25/-127	4.3/85	0.08/62	0.50/-33
		2.1	0.19/160	2.3/54	0.15/63	0.47/-47
		3.0	0.24/123	1.7/34	0.22/60	0.48/-63
		4.0	0.32/100	1.4/16	0.30/53	0.50/-82

表 2 实测结果

$V_{ce}$ (VV)	$I_c$ (mA)	$f$ (GHz)	$S_{11}$ (Mag/Deg)	$S_{21}$ (Mag/Deg)	$S_{12}$ (Mag/Deg)	$S_{22}$ (Mag/Deg)
6.1	5.0	1.0	0.28/-129	4.5/90	0.09/62	0.52/-33
		2.0	0.16/176	2.4/66	0.16/68	0.51/-36
		3.0	0.18/122	1.7/50	0.23/68	0.48/-44
		4.0	0.29/91	1.4/37	0.32/64	0.42/-53

## 2 电路稳定性设计

电路稳定性设计是其它设计的前提,不稳定的原因在于偏置电路,在于输入输出匹配网络,但引起不稳定的最主要原因是晶体管的寄生反馈,即和晶体管的 S 参数有关。电路稳定性分为不稳定、潜在不稳定和无条件稳定,所谓无条件稳定是指在无源负载的前提下电路不会产生

振荡,如果输入输出阻抗实部不大于零,则电路是潜在不稳定的<sup>[7]</sup>。在工作频率下,可以用稳定性判据判断稳定性,  $|\delta| < 1, K > 1$  即无条件稳定,也可以在 Smith 圆图上画出输入输出稳定性判别圆,以确定电路的稳定区域,实际上,使用虚拟网络分析仪进行电路稳定性判断,更加直观方便。对于以上电路(图 1),运行仿真分析,在网络分析仪中可以得到不同频率点的稳定因子  $|\delta|$  和  $K$ ,用以上判据

就可以判断稳定性,或者单击匹配网络设计,选择稳定性圆图标签,调整频率,可以看到输入输出稳定性 Smith 圆图,更加直观的判断电路稳定性。实际仿真结果表明,以上电路在某些频率范围内是潜在不稳定的,如图 2 所示。

稳定性设计是非常重要的,可以采用负反馈电路、铁氧隔离器、稳定器等措施<sup>[8]</sup>,在以上图 1 电路中加入信号源阻抗 50,负载阻抗 50,合理配置偏置网络,通过抑制一部分增益的方法提高电路的稳定性,改造后的电路如图 3 所示。在 Multisim 中运行仿真,打开虚拟网络分析仪,观测 Smith 稳定性圆图,可以看到电路在 1 MHz~10 GHz 频率范围内,无条件稳定。

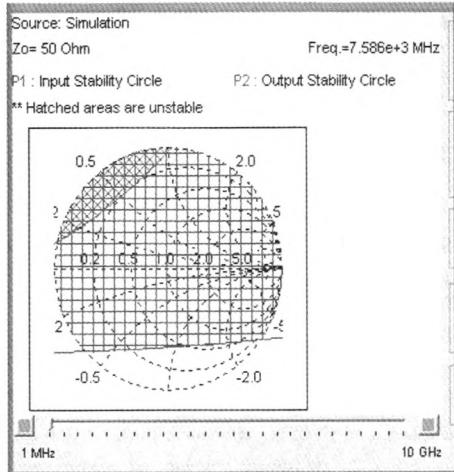


图 2 Smith 稳定性圆

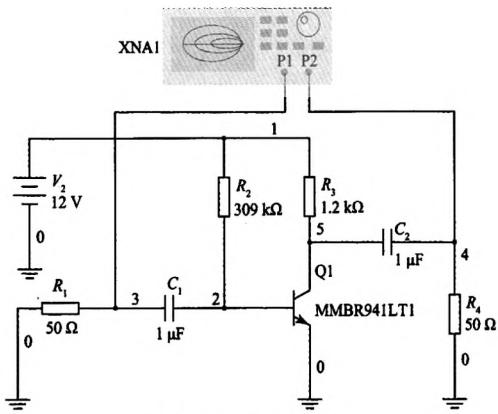


图 3 RF LNA 电路

### 3 阻抗匹配网络设计

RF LNA 匹配网络设计包含噪声匹配设计和阻抗匹配设计,往往两者不能兼顾,为了得到合适的增益,首先要考虑的是电路输入输出端的阻抗匹配网络设计<sup>[9-10]</sup>。由于电路的输入阻抗和信号源阻抗不匹配,输出阻抗和负载阻

抗不匹配,导致射频电路不能传递最大功率增益,为此,需要改进电路结构,在输入输出端加入阻抗匹配网络,虚拟网络分析仪中有自动进行阻抗匹配网络设计的功能。对图 3 中电路进行仿真,在网络分析仪中测得 1 GHz 频率点的一般功率增益为  $PG=5.296 \text{ dB}$ ,不能满足放大电路整体增益要求(最小增益为 6 dB)。在 Multisim 停止仿真后,在网络分析仪面板右侧 Mode 区域按下 Match Net Designer(匹配网络分析模式)按钮,即可以进行阻抗匹配网络设计。单击 Stability Circles 标签,把频率调到 1 GHz,其中 Stability 项显示 Unconditionally Stable,说明电路无条件稳定。在电路稳定的基础上才可以进一步设计阻抗匹配网络,单击 Impedance Matching 标签,可以在图上选择不同的匹配电路结构,本电路选择电感电容网络,在右下角选中 Auto. Match,即可以自动计算出匹配元件的大小,如图 4 所示。

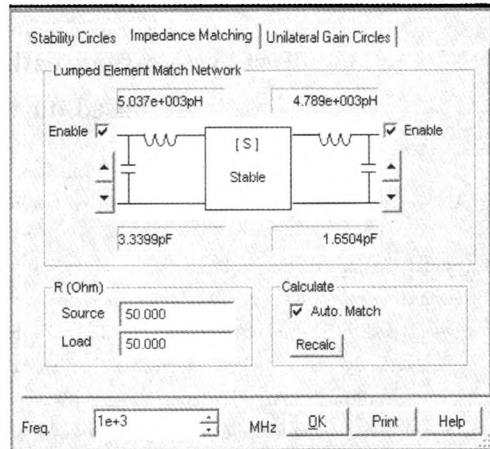


图 4 阻抗匹配网络

在图 3 电路输入输出端加入图 4 中设计出来的阻抗匹配网络,其中的元件用数值最接近的实际元件代替,得到完整的单级 RF LNA 电路,如图 5 所示。

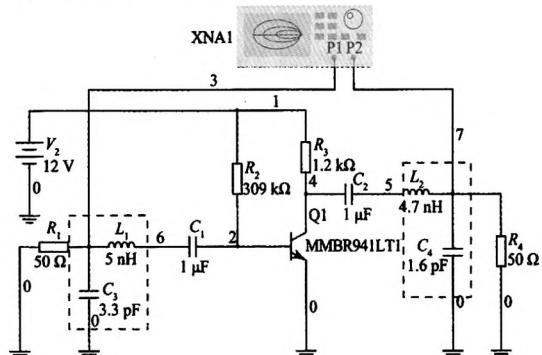


图 5 加入匹配网络的 RF LNA 电路

(下转第 119 页)

实验研究[J]. 低压电器, 2009, 12(15): 8-12.

- [10] 刘颖异, 陈德桂, 袁海文, 等. 带电流反馈的永磁接触器动态特性仿真与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 7(15): 118-124.
- [11] 姬丽娟, 苏秀萍, 王丽华, 等. 基于 ANSYS 的交流接触器电磁机构的三维有限元分析[J]. 计算机应用与软件, 2005, 20(7): 136-137.

(上接第 97 页)

对上面电路重新进行仿真测试, 电路 1 GHz 频率点的一般功率增益  $PG=7.078$  dB, 仿真结果表明, 加入阻抗匹配网络后, RF 电路的增益有所提高, 其中一般功率增益由 5.296 dB 增加到 7.078 dB, 基本能满足 RF LNA 的设计增益指标要求(6 dB)。对单级放大电路的增益要求不能太高, 必须在电路稳定的前提下进行设计, 一般要阻抗匹配设计和噪声匹配设计结合起来, 在降低噪声增益的同时取一个合适的放大增益数值, 同时要求 LNA 降低功耗, 如单级电路不能满足要求, 可以考虑采用多级放大电路或者 RF LNA 集成电路。实际工作的 LNA 电路要求单向传输特性, 设计要求输出驻波比小于 1.2, 对图 5 电路仿真测出 1 GHz 点的  $S_{22}=0.407/-135.909$  Deg, 经计算电路输出驻波比  $SWR=(1+S_{22})/(1-S_{22})=2.37>1.2$ , 符合电路设计要求。以上电路设计完成后经过实际测量, 表明各项性能指标符合电路设计要求。

## 4 结 论

上面以一个实际的 RF LNA 电路的设计为例, 从 3 个方面阐述了 Multisim 的虚拟网络分析仪在射频电路设计中的应用。在设计实践中, 射频电路的性能指标要综合考虑, 电路偏置结构, 电路稳定性, 电路增益和匹配网络往往需要反复调试, 为了达到某一设计目标还要增加电路的复杂程度, 设计难度很大。虚拟网络分析仪适应这种需求, 使用简单方便可靠, 并且不会损耗真实元件和仪器, 仿真精确度高, 可以极大的缩短设计周期。在设计仿真成功后, 可以使用和 Multisim 兼容的 Ultiboard 直接进行高速 PCB 设计, 可以使用 NI 公司的 LABVIEW 的 RF 模块对样机进行测试验证, 这种组合对于射频通信电子产品的研发无疑是很好的选择。

## 参 考 文 献

- [1] 池保勇, 余志平, 石秉学. CMOS 射频集成电路分析

## 作 者 简 介

黄文峰, 男, 1986 年 10 月出生, 工学学士, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机检测与控制技术。  
E-mail: laoshu658@163.com

与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 78-79.

- [2] 胡乃英, 武岳山. 通信系统的 Multisim 仿真分析[J]. 电子测量技术, 2007, 30(5): 142-144.
- [3] 陈峰. 射频微波电缆测试方法[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(8): 17-20.
- [4] 黄智伟. 射频小信号放大电路设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 146-147.
- [5] 李松松, 李响, 高晓也. Multisim10 在射频电路实验教学中的应用研究[J]. 现代电子技术, 2010, 16(18): 172-175.
- [6] 董政洁, 刘桂礼, 王艳林, 等. 基于 S 参数传输法的石英晶体静电容测量[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 892-897.
- [7] 罗建国, 游治. 基于史密斯圆图分析射频放大器的设计[J]. 武汉大学学报(理学版), 2005, 51(1): 123-128.
- [8] 赵明国, 薛严冰. Ku 波段低噪声放大器的设计[J]. 遥测遥控, 2011, 32(2): 25-28.
- [9] 窦建华, 徐兰天, 杨学志. 测量匹配网络 S 参数的转换模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(2): 191-197.
- [10] 刘彦鹏. 基于 Multisim10 的 I 端口参数的测量[J]. 电气电子教学学报, 2011, 33(5): 63-65.

## 作 者 简 介

王立华, 男, 1970 年 11 月出生, 讲师, 主要研究方向为电子系统设计仿真和高速 PCB 设计等。  
E-mail: wangleiha@163.com

## 微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，推出多套微波射频以及天线设计培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>

---

### 微波射频测量仪器操作培训课程合集



搞硬件、做射频，不会仪器操作怎么行！对于射频工程师和硬件工程师来说，日常电路设计调试工作中，经常需要使用各种测试仪器量测各种电信号来发现问题、解决问题。因此，熟悉各种测量仪器原理，正确地使用这些测试仪器，是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能，该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟悉掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

---

### 矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器；该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装，包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材，能够帮助微波、射频工程师快速地熟悉掌握矢量网络分析仪使用操作…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>

---



### 示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器，因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解，也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解，能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>