

混响室环境中矢量网络分析仪 S 参数自动测量程序的开发

庞荃芪¹ 赵翔¹
PANG Quanqi ZHAO Xiang

摘要

混响室通过其内置搅拌器的旋转能够提供随机变化的电磁环境，从而满足电磁兼容和无线通信领域的测量需求。在混响室环境中使用矢量网络分析仪（vector network analyzer, VNA）测量待测设备的多组 S 参数数据时，测量过程繁复。文章基于 LabVIEW 开发了 S 参数自动测量程序，实现了对 VNA 的自动控制，包含 VNA 识别、初始化和参数设置以及 S 参数的读取和存储。该程序不仅提高了测量效率，还避免了人工操作误差，可应用于混响室内天线效率、材料吸收截面等参数的测量。

关键词

混响室；矢量网络分析仪；LabVIEW；S 参数；自动化测量

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.039

0 引言

混响室本质上是一个电大多模、高品质因数的谐振腔，由金属屏蔽室和搅拌器构成。搅拌器的旋转改变了混响室的边界条件，从而赋予混响室产生随机变化电磁环境的能力，可应用于电磁兼容和无线通信领域的测量^[1-3]。

S 参数表示微波网络中某一端口的反射功率和到其他端口的传输功率相对于入射功率的比例，可由端口间归一化电压波的比值求得^[4]。S 参数的实部和虚部包含了幅度和相位信息，可用于评估待测设备（device under test, DUT）的传输和反射特性。矢量网络分析仪（vector network analyzer,

VNA）可同时测量 S 参数的实部和虚部^[5]。在混响室环境中使用 VNA 对 DUT 进行测量时，需要重复获取 DUT 在不同搅拌器位置下的 S 参数。

随着混响室研究的不断深入，其在电磁兼容和无线通信测量领域的应用也不断拓展，实验数据更加复杂，测量过程的自动化操作需求也在增加^[6]。2007 年，王晓伟^[7]基于 C++ 程序控制场强探头和频谱分析仪，实现了混响室空腔室校准和最大加载校准的自动化；2014 年，许宏光^[8]基于 C# 设计了混响室环境中 DUT 的辐射抗扰度自动测试程序；2018 年，王少华等人^[9]基于 LabVIEW 程序控制场强探头实现了混响室的场均匀性的自动测试；Amorim 等人^[10]基于 MATLAB 软件控制频谱分析仪实现了混响室的品质因数测试的自动

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

和无规律变化，实现风电场调频响应指标的快速确定。同时，采用简化功率实线代替实际功率曲线的方法，在保证计算精度的前提下，显著提高了计算速度，满足了风电场快速响应调频需求。通过对比不同风速下的简化功率实线与实际功率曲线及其对应的频率响应，发现简化功率实线在功率增发段与实际功率曲线拟合度较高，且频率响应误差较小，验证了简化功率实线替代方法的有效性。本文提出的风电场调频响应指标决策方法具有快速、准确、实用的特点，能够为风电场参与电力系统频率调节提供有力的技术支持，对于促进新能源的充分利用和电力系统的稳定运行具有重要意义。

参考文献：

[1] 陈亦平, 卓映君, 刘映尚, 等. 高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10):174-183.

[2] MENG X, LIU J J, LIU Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control[J]. IEEE transactions on power electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.

[3] 彭琰, 马骏超, 金字清, 等. 风电参与电网频率支撑的快速仿真模型 [J]. 浙江电力, 2022, 41(5):40-46.

[4] 张冠锋, 杨俊友, 孙峰, 等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 225-232.

【作者简介】

张泰东（1999—），男，安徽肥东人，硕士研究生，助理工程师、机电设备管理员，研究方向：电机与电器。

（收稿日期：2025-01-09 修回日期：2025-04-16）

化; 2021 年, 李可^[11]基于 C++ 程序控制频谱分析仪实现了混响室场均匀性的自动化校准。上述研究所设计的程序功能集中于对混响室或 DUT 单一参数的测量, 难以满足混响室多样化的测量需求。

本文基于虚拟仪器软件结构(virtual instrument software architecture, VISA)、可编程仪器标准命令(standard commands for programmable instruments, SCPI)协议和 LabVIEW 开发的混响室环境中 VNA 的 S 参数自动测量程序。VISA 是美国国家仪器公司(national instruments, NI)提供的一种统一的接口标准, 使计算机和 VNA 可以通过接口完成通信。SCPI 协议为计算机控制 VNA 提供了统一标准命令集, 清晰直观, 扩展性高。不同于 MATLAB、C++ 等计算机编程语言, LabVIEW 采用图形化编程方式, 适用于虚拟仪器(virtual instrument, VI)的开发, 代码逻辑更加直观。

1 自动测量程序的设计与实现

1.1 VNA 的连接设置

本文使用通用接口总线(general purpose interface bus, GPIB)连接 VNA 和计算机。图 1 是程序到 VNA 的仪器控制层次图, 展示了程序通过 VISA 标准和接口驱动实现控制仪器的流程。

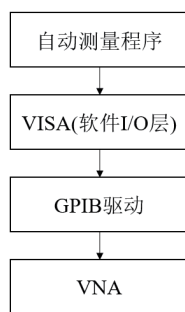


图 1 程序到仪器控制层次

由于计算机未配置 GPIB 接口, 因此需要借助 GPIB-USB-HS 数据采集卡连接计算机和 VNA, 并使用相应的驱动程序。为实现计算机和 VNA 的通讯, 要求设备间的 GPIB 接口相同而地址不同。计算机可在 National Instrument - Measurement and Automation Explorer 工具中进行接口与地址参数的设置, 并完成 VNA 连接的调试。

1.2 基于 SCPI 的命令

SCPI 通信协议定义了基于文本的命令和语法, 计算机可以发送命令设置仪器参数并完成测量^[12]。一条完整的 SCPI 命令由多个助记符按照树形分层结构书写。

图 2 以测量 DUT 在 2 GHz~3 GHz 的 S_{11} 为例, 展示了利用 SCPI 命令控制 VNA 的流程。在控制前, 需要清空仪器的事件寄存器和错误队列, 以完成仪器的初始化。而后需要获取 VNA 的设备信息, 返回仪器的型号等数据并完成仪器的识别。初始化完成后, 需要设置 VNA 的起止频率、测量点数和测量数据类型, 设置完毕后完成 VNA 的校准即可开始数据测量。等待测量完成后, 可根据需要选定 S 参数测量值并设置数据格式。最后按照设置的数据格式, VNA 将采集到的 S 参数实部和虚部数据传入计算机中。

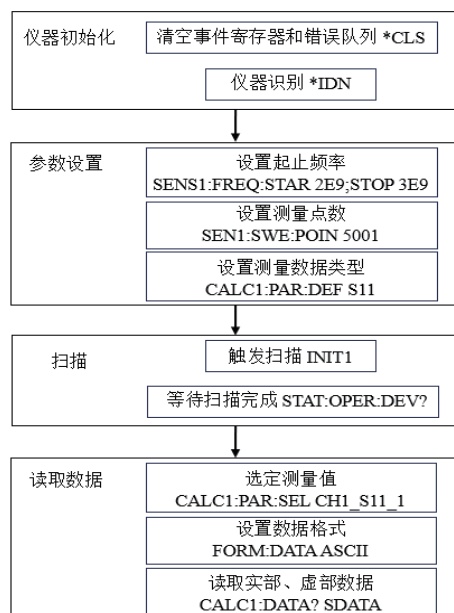


图 2 VNA 的 S 参数自动测量流程

1.3 S 参数自动测量程序

本文所设计的 S 参数自动测量程序主要可分为前面板、参数设置模块、数据读取模块和数据处理模块, 通过将各个模块封装成驱动子 VI 的形式, 使程序开发更加简便直观。

本文所设计的前面板如图 3 所示, 本文将前面板分为两个区域, 分别是上方的测量控制区和下方的数据显示区。测量控制区包含测量相关参数和存储路径的设置, 测量开始与停止的控制等功能。数据显示区则能显示 VNA 实时测量的 S 参数数据。



图 3 S 参数自动测量程序前面板

图 4 是参数设置模块的程序框图。以该程序框图中首个命令为例, 格式化写入工具将通道参数和起止频率依次替换掉字符串中的“%d”和“%g”, 输出 SCPI 命令“SENS1:FREQ:STAR 2E9;STOP 3E9”。之后 VISA 写入工具获取仪器的地址, 并将该命令写入仪器, 从而设置了 VNA

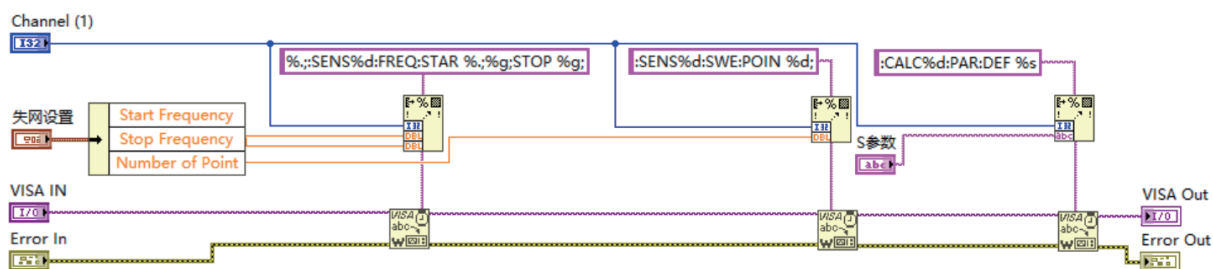


图 4 VNA 参数设置模块程序框图

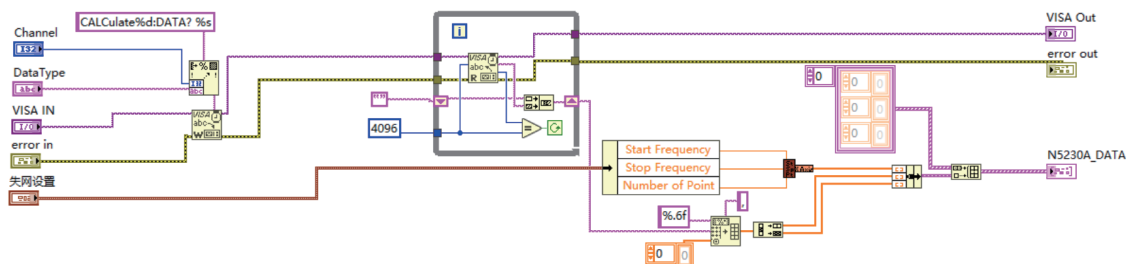


图 5 VNA 数据读取模块程序框图

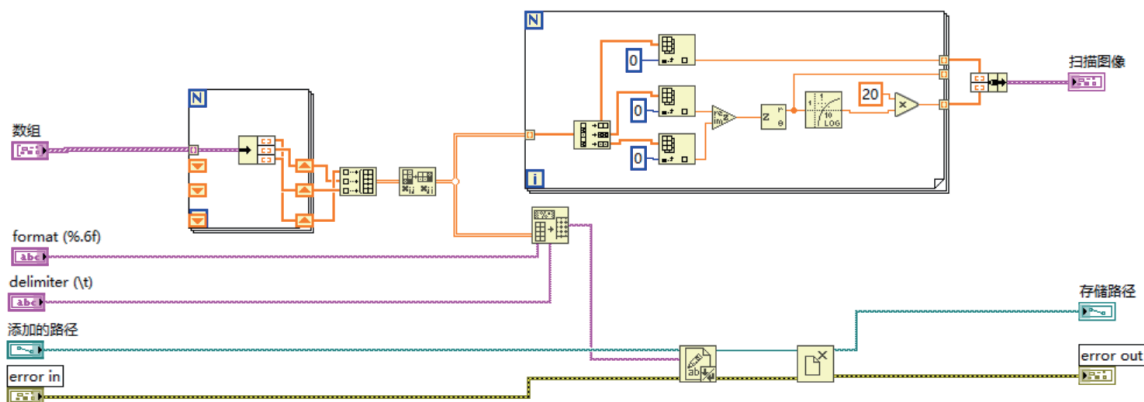


图 6 S 参数数据处理模块程序框图

的起止频率。本文的驱动子 VI 将输入参数均放置在程序框图最左端，输出参数则在最右端。这样书写不仅保证了程序的可读性，还优化了 VI 的效率。

图 5 展示了计算机从 VNA 读取 S 参数数据的过程。该模块通过 VISA 读取工具，从缓存中读取 S 参数的实部和虚部信息，并将读取到的 S 参数数据按照频率、实部和虚部进行分组，最后将 S 参数数据以数据簇形式输出到控件中。

图 6 所示的数据处理模块的功能包含对 S 参数数据的存储、处理和显示。该驱动子 VI 实现了计算机存储 S 参数数据的自动化，使得混响室中不同搅拌器位置下 DUT 的 S 参数数据能够依序保存。通过对 S 参数数据进行预处理并以图像形式展示，便于用户观察。

2 结果与分析

本文使用 S 参数自动测量程序控制 VNA 测量喇叭天线在混响室中的 S_{11} 数据。在混响室测量过程中，伺服电机控

制搅拌器以步进形式转动一周，该自动测量程序则对 100 个不同搅拌器位置下的天线 S_{11} 数据进行测量并保存。为了验证混响室测量数据的可重复性，进行了两次测量。

图 7 所示为某一搅拌器位置下的前面板中天线 S_{11} 测量结果图，可以帮助用户在扫描过程中对天线的 S_{11} 数据进行大致的掌握。

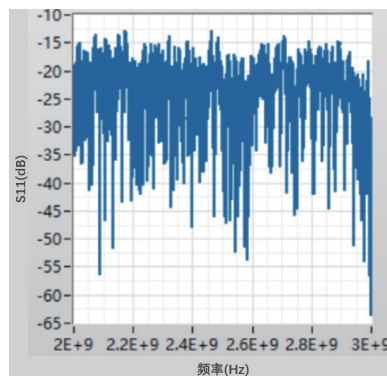


图 7 S_{11} 数据测量结果

图8展示了天线在2.1 GHz~2.9 GHz范围内9个频点处 S_{11} 实部和虚部的散点图以及所有搅拌器位置上的 $|S_{11}|$ 平均值。其中，“×”和“·”两种符号分别表示两次测量的数据；作为参考，自由空间测得的数据由星形符号“★”标示；最大的两个圆的半径分别是两次测量的 $|S_{11}|$ 平均值，分别用实线和虚线绘制。

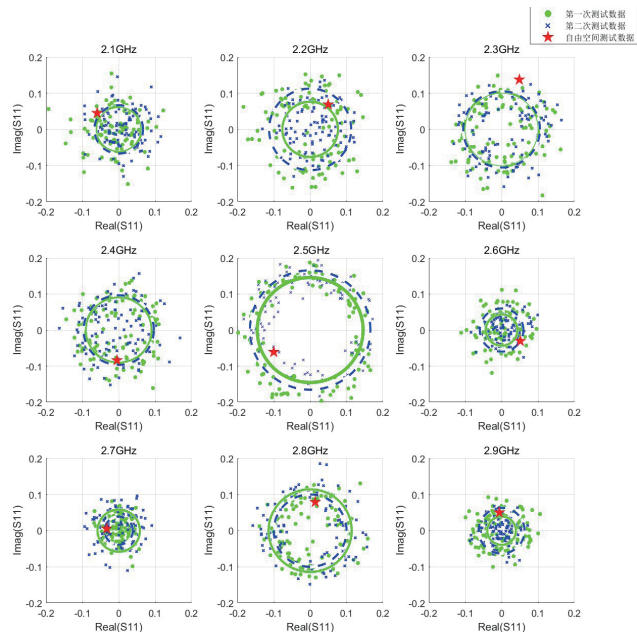


图8 混响室中喇叭天线在2.1 GHz~2.9 GHz的 S_{11} 散点图和 $|S_{11}|$ 均值

散点图内圆点在4个象限均匀分布，表明搅拌器旋转一周过程中，测得的天线 S_{11} 的相位均匀分布，搅拌效果良好。不同频率中圆点所聚集的位置有所差异，如2.7 GHz和2.9 GHz的散点图集中于原点，可知 $|S_{11}|$ 均较小，表明天线在此频率下匹配良好；而2.5 GHz和2.8 GHz的散点图，相较于其他频率，在原点附近存在较大空隙，可知 $|S_{11}|$ 均偏大，表明天线在该频率点的匹配较差。

根据 $|S_{11}|$ 均值所绘制的圆，不同频率中实线和虚线的半径均相近，这表明两次测量的 $|S_{11}|$ 均值相近，测量数据具有较好的可重复性。此外，星形符号的位置也表明自由空间的测量数据与混响室中的具有一致性。

3 总结

本文利用GPIB驱动和VISA标准连接VNA，基于LabVIEW将SCPI命令封装为VI，开发了控制VNA进行S参数自动化测量的程序。计算机可利用该程序设置VNA的测量参数，控制S参数数据的读取、存储和显示。利用该程序测量了混响室中不同搅拌器位置下喇叭天线的 S_{11} 数据，通过对比测量数据，验证了混响室的搅拌效果良好且测量结果具有较好的可重复性。该程序可为天线效率、材料吸收截面等测量提供快捷的S参数数据获取手段。

参考文献:

- [1] FLINTOFT I D, BALE S J, PARKER S L, et al. On the measurable range of absorption cross section in a reverberation chamber[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2016,58(1):22-29.
- [2] DE LEO A, RUSSO P, PRIMIANI V M. Emulation of the rician k-factor of 5G propagation in a source stirred reverberation chamber[J]. Electronics, 2022, 12(1): 58.
- [3] 刘劭楠. 基于混响室的材料吸收截面测量研究与应用[D]. 北京:北京邮电大学,2018.
- [4] LUDWIG R, BRETCHKO P. RF circuit design: theory and applications [M]. USA:Prentice Hall,2008.
- [5] HAMMERSCHMIDT C, JOHNS R T, TRAN S. Calibration of vector network analyzer for measurements in radio frequency propagation channels[EB/OL].(2020-06-03)[2024-09-11]. <https://www.x-mol.com/paper/1759293521647079424?adv>. DOI:10.3791/60874-v.
- [6] CHEN X M, TANG J Z, LI T, et al. Reverberation chambers for over-the-air tests: an overview of two decades of research[J]. IEEE access, 2018,6: 49129-49143.
- [7] 王晓伟. 混响室校准自动测试系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2007.
- [8] 许宏光. 基于C#的混响室自动化校准及测试软件的开发以及混响室内场强特性的研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [9] 王少华, 刘科, 杨丽, 等. 100MHz~18GHz混响室场均匀性测试及分析[J]. 计量技术,2018(12):23-26.
- [10] DE AMORIM R, FONTGALLAND G, PEDRO H J G, et al. Design and implementation of a measurement system for characterization of reverberation chamber[C/OL]//2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC).Piscataway:IEEE, 2018[2024-11-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8409884>.DOI: 10.1109/I2MTC.2018.8409884.
- [11] 李可. 电磁环境混响室测试场强均匀方法研究[D]. 浙江:浙江大学,2021.
- [12] 盛文举, 马清峰. 基于SCPI命令的函数信号发生器程控软件设计[J]. 电子测试,2022,36(21):87-89.

【作者简介】

庞荃芪(1999—), 男, 四川威远人, 硕士研究生, 研究方向: 电磁兼容。

赵翔(1973—), 女, 四川西昌人, 博士, 教授、博士生导师, 研究方向: 电磁兼容分析与电磁效应评估。

(收稿日期: 2025-01-15 修回日期: 2025-05-16)