

2025 年全国大学生电子设计竞赛 江苏赛区（TI 杯）

题目： 电路模型测量装置

题目编号： G

参赛队编号： NJ803

参赛队学校： 南京邮电大学

参赛队学生： 章耀康 游旭坤 邬佳俊

二〇二五年八月

电路模型探究装置

南京邮电大学

摘要

本文提出了一种基于 FPGA 的二阶 RLC 系统建模方法。系统通过 FPGA 及高速 AD/DA 转换器实现正交扫频，测得原系统的复频响。随后使用机器学习中常用的非线性最小二乘估计方法，结合高斯-牛顿算法迭代以拟合 RLC 网络的二阶 s 域模型，并利用频率预畸变与双线性变换实现 z 域建模。针对传统二阶 IIR 系统可能出现的不稳定或临界稳定情况，本文还提出了一种创新性的子带 IIR 滤波方案。最终，本系统能够准确、稳定地完成二阶 RLC 网络建模，并在 FPGA 上使用优化后的子带 IIR 滤波结构，实现与原 RLC 系统同频、同增益、无漂移的完美重建。

关键词：系统建模，同步采样扫频，非线性最小二乘，双线性变换，IIR 滤波器，数字信号处理，子带滤波

1. 系统方案设计与实现

1.1 总体系统框架概述

本系统能够输出单频测试信号，或对测试系统进行扫频，能根据复频响对 RLC 网络进行建模，并使用 FPGA 等效实现二阶 RLC 系统，与原有 RLC 网络产生相同响应。

系统具体实现了以下功能：

- 输出频率、幅度可调的测试信号
- 可实现 200-1.6MHz 的对数扫频，测量系统复频响
- 利用数字信号处理算法对系统有效拟合、建模
- 对 RLC 网络学习建模，建立与原系统等效的频率响应

1.2 系统构成

系统使用 MCU 作为主控，型号为 STM32H750VBT6，负责整体资源调度。MCU 承担了软件算法计算任务，其上以 c 语言实现了非线性最小二乘、高斯-牛顿迭代、矩阵多项式求解、双线性变换在内的多种复杂算法。此外，MCU 还负责显示逻辑控制，其配备了大尺寸电容触摸显示屏，提供了良好的人机交互体验。

系统中使用 FPGA 结合高速 AD/DA 转换器作为数字信号处理器，其上复用了单音信号发生、同步采样的 IQ 扫频、自适应子带 IIR 滤波等功能。其中，FPGA 的型号为 Xilinx 7z020clg400-1，ADC 选型为 ADS62C17，DAC 选型为 AD9744。FPGA 与 MCU 通过高速 SPI 进行通信。

系统还包含必要的外围模拟器件。包含 AD826 缓冲器，以及其它必要的放大、衰减、滤波电路。各模块间主要通过 SMA 接口的同轴线缆连接，部分低频信号使用 xh2.54 排线或 2.54mm 硅胶杜邦线连接。

1.3 总体功能框图

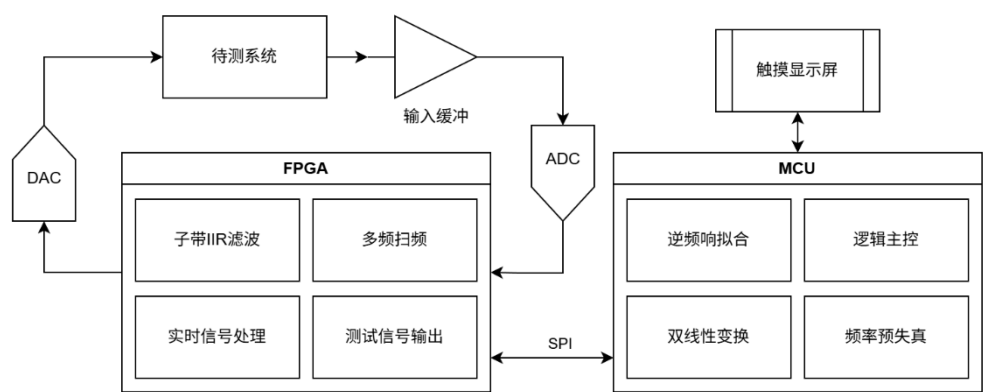


图 1.1 系统框图

2. 核心硬件电路设计

2.1 缓冲器

缓冲器选用双路运算放大器 AD826，其具备良好的阻抗特性，常被用作 AD/DA 缓冲器、视频缓冲器等。对于要求范围内的 RLC 取值，此设计能起到有效的缓冲作用。使用标准的高阻跟随结构。

2.2 高速 ADC

系统使用 ADS62C17 高速双通道 ADC，数据位数 11 位，采样率达 200MSPS，可用于实现系统需要的正交同步扫频。ADC 前级选用 THS4521 全差动放大器，产生差分输出并提供优秀的噪声抑制。原理图如下：

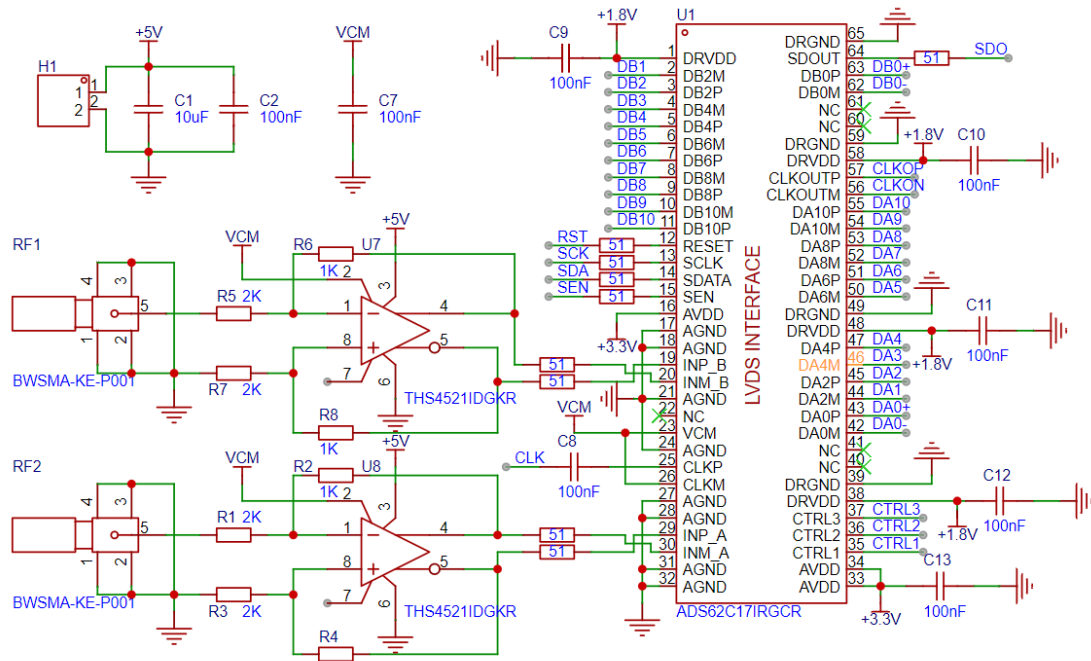


图 2.1 ADS62C17 原理图

2.3 高速 DAC

系统的 DAC 选型为 AD9744，其具有 14 位位宽和 210MSPS 采样率，能够产生精确性高、失真小的测试信号。DAC 发射端匹配有专门 LC 滤波器以及 OPA2822 运放缓冲输出。其原理如图：

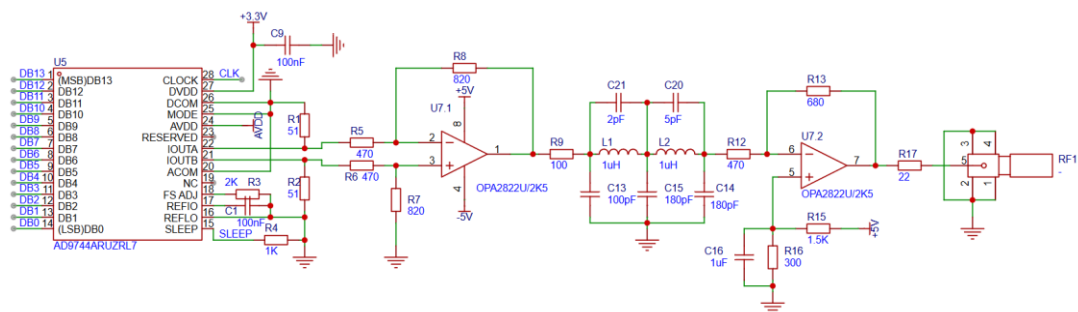


图 2.2 AD9744 原理图

三、关键技术创新及原理概述

3.1 正交扫频

为了获取系统的复频响，常使用**正交扫频**（IQ Sweep）技术。该技术在每个频率点使用形如：

$$x(t) = A\cos(\omega t) + j\sin(\omega t) = Ae^{j\omega t}$$

的复数激励，通过正交混频将信号下变频至直流，结合低通滤波器提取出同相与正交分量。由此计算出系统在该频点的复数响应：

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{I + jQ}{A}$$

从而完成对系统幅频、相频特性的测量。

3.2 逆频响拟合

逆频响拟合（InvFREQS 或 InvFREQZ）能通过已知系统频率响应，来反推其传递函数（差分或微分方程形式）。本项目面向资源受限的嵌入式平台，融合机器学习中常用的**最小二乘估计**及**Gauss-Newton 迭代法**，自主研发了一套轻量化的 InvFREQS 算法实现，专用于嵌入式设备频率响应拟合任务，其核心实现原理如下：

二阶模拟系统传递函数包含 5 个复系数，我们将复系数的求解问题转化为**最小二乘问题**，通过构建线性化方程组： $A \cdot X = B$ （A 为复系数矩阵，x 为待求系数向量，B 为目标频响）对未知复系数进行求解。使用正规方程：

$$x = (A^H A)^{-1} A^H B$$

并通过**高斯-约旦求逆算法**求复数矩阵的逆，最终即能解得传递函数的系数向量 x 。

在此基础上，我们使用 C 语言实现了完整的 InvFREQS 与 InvFREQZ 算法。算法复原产生的系统函数能够正确拟合输入的频率响应，具有诸多优点：

- (1) 拟合**精度高**、损失小
- (2) 对**局部噪声不敏感**，拟合曲线平滑、稳定（不易过拟合）
- (3) **移植性强**，算法实现只依赖标准数学库（math.h）

图为算法对各类滤波器的拟合结果，该算法在面对含噪频率响应数据时依然能够稳定恢复出近似理想的系统模型，表现出色。

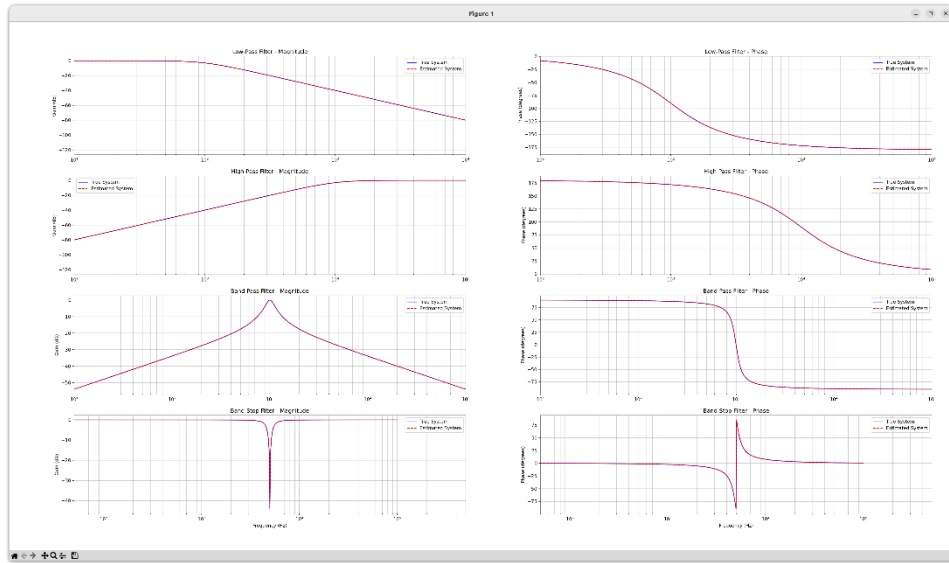


图 3.1 拟合情况

3.3 双线性变换

为了使系统能在 FPGA 上实现，需将拟合得到的 s 域方程转换到 z 域。**双线性变换** (Bilinear Transform) 是一种常用的转换方法，能将模拟系统的传递函数 $H(s)$ 映射为对应的数字传递函数 $H(z)$ ，并保留其稳定性和频响特性。

双线性变换基于以下映射关系，将 s 域中的复频率变量 s 替换为 z 域变量 z 的函数：

$$s = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

该变换将 s 平面左半部分映射到单位圆内，保证了稳定系统在 z 域中仍保持稳定。类似在 DA 转换前进行的频率预失真过程，尽管非线性映射会压缩频率轴（尤其在高频），但可在数字器件中通过**频率预畸变** (Pre-warping) 技术进行有效的补偿。为减小频率非线性压缩产生的误差，在变换前应对目标频率点 w_a 应用预失真：

$$w_d = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{w_a T}{2}\right)$$

通过此方法，我们实现了系统从 s 域到 z 域的转换，同时确保频率响应稳定、失真小、无混叠，并通过 FPGA 上实现的 IIR/FIR 系统完成对原始 RLC 系统的重现。

3.4 子带滤波

在 FPGA 上直接实现二阶自适应 IIR 滤波器，于稳定性方面存在巨大挑战。受到原 RLC 网络稳定性情况、建模过程产生的误差以及 FPGA 位宽量化产生的精度丢失等多种复杂因素影响，直接在 FPGA 上实现 IIR 滤波器在极端情况下存在失稳风险。

为解决这一问题，我们引入了**子带滤波**（Subband filtering）思想，将原信号下采样后分解为多个频率子带，在各个子带使用更稳定的低阶 IIR 滤波器替代不易稳定的高阶 IIR 系统。特别的，我们**创新性的使用正交上/下变频方法**，允许系统引入一个任意的**旋转因子**，构成一个幅度/相位都可调的自适应带通滤波器，以最佳拟合原系统的幅频与相频响应。

滤波器简化结构如图：

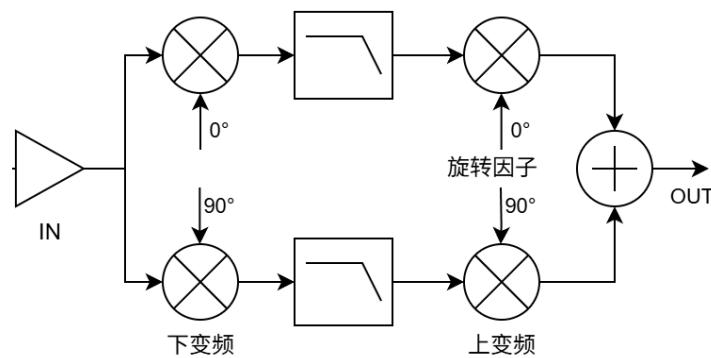


图 3.2 滤波器设计

通过多个子滤波器构成滤波器组，该 IIR 系统最终能在保证稳定的情况下，对原模拟系统频响进行有效的拟合，并实现与原 RLC 系统输出同幅度、同相位且稳定无漂移。

4. 测试方案与测试结果

4.1 测试条件

品牌	型号	类型
SIGLENT	SDS824X	示波器（支持波特图测量）
SIGLENT	SDG2082G	信号发生器
SIGLENT	SDM3055X-E	台式万用表
SIGLENT	SPD3303X-E	线性稳压电源

表 1. 测试环境

4.2 测试方案及结果分析

4.2.1 单频输出

使用示波器 measure 功能对输出正弦波的峰峰值进行测试，发现 dac 输出幅度准确，在最坏的情况下存在 1.2%幅度偏差。对于开环系统，这是一个合理且可接受的误差范围。我们认为系统的单频输出功能能够正确工作。

4.2.2 扫频

我们搭建了一个测试用 RLC 网络，形成一个标准的高通滤波器，使用仪器绘制其波特图，结果如下：

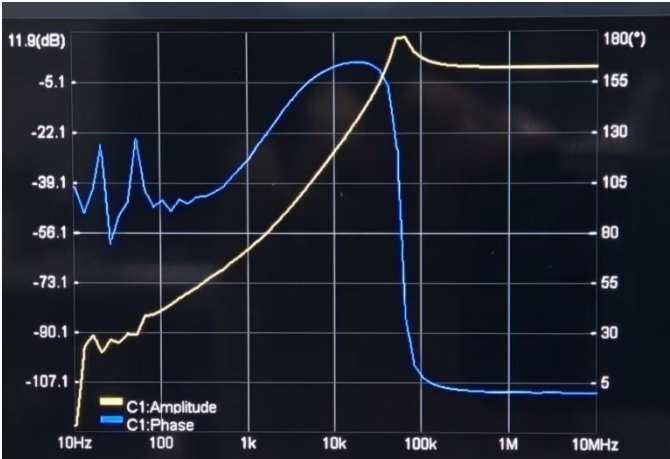


图 4.1 波特图

再使用系统扫频功能，进行 10 点/dec 的频响测量，将产生的数据导出到 PC 设备，用 python 绘出如下图像：

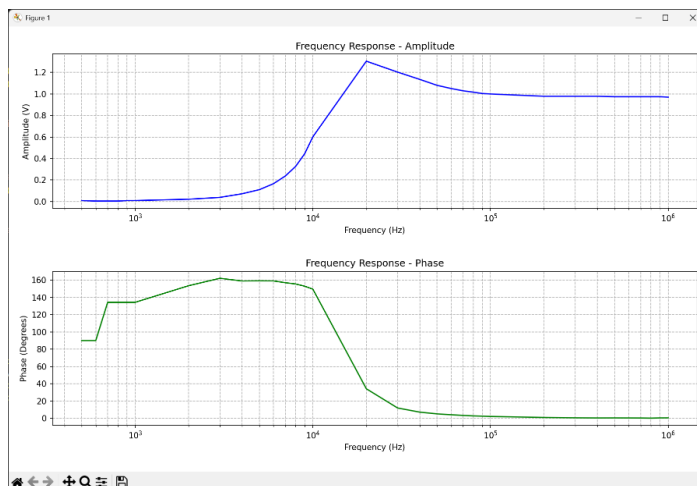


图 4.2 扫频结果

系统测量出波特图的形状、数值皆与基准仪器的结果高度相似，且完整测试过程仅耗时约 100ms，表现出扫频功能优异的速度与准确性

4.2.3 学习后输出

经过测试，在完成系统建模之后，通过子带 iir 滤波器能在示波器上建立同幅度、同频率、的复原信号。复原信号误差范围较小，方波、三角波等波形都能实现稳定显示。

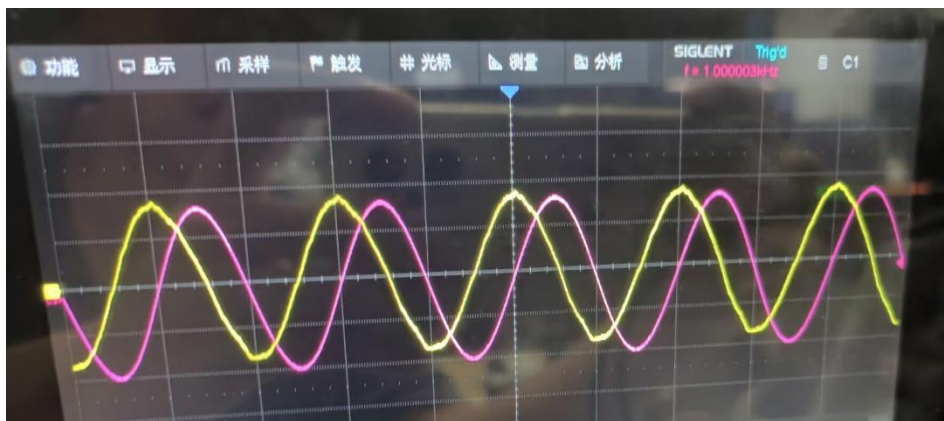


图 4.3 同频稳定显示

5. 参考文献

华成英 《模拟电子技术基础》

C.C. McAndrew, ‘Practical modeling for circuit simulation’

(<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/66120>)

Steven W. Smith, ‘Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists’

6. 附录

