



华南师范大学

《信号与系统》

综合设计实验技术报告

设计课题：二阶高通巴特沃斯滤波器的设计

指导老师：戴飞鹏、穆丽伟

学生姓名：Hypo

学 号：

院 系：物理与电信工程学院

专 业：通信工程

二阶高通巴特沃斯滤波器的设计

摘 要

在学习《信号与线性系统分析》的基础上，针对课程设计要求，设计一个通带为 500KHz 的高通滤波器，选择有频率响应曲线最为平滑的巴特沃斯滤波器作为设计方案，结合 Filter Solutions 给出初步设计方案，并通过 MATLAB、Proteue 进行软件仿真和电路板的制作，并对所选的方案进行调试，并将实际设计的滤波器与仿真得到的滤波器进行比较，验证方案的正确性。

关键词：滤波器；仿真；Filter Solutions；调试

目 录

第 1 章 方案选择.....	1
1.1 巴特沃斯滤波器的特性	1
1.2 使用 Filter Solutions 软件生成滤波器设计方案	1
1.3 结合实际情况对方案进行调整	3
第 2 章 理论计算.....	4
2.1 传递函数极其推导	4
2.2 使用 Matlab 对传递函数进行检验	5
第 3 章 软件仿真.....	6
3.1 使用 Matlab 进行仿真	6
3.1.1 系统阶跃响应.....	6
3.1.2 系统冲激响应.....	6
3.2 使用 Proteus 进行仿真	7
3.2.1 系统原理图.....	7
3.2.2 系统幅频特性以及相频特性.....	7
3.2.3 系统阶跃响应.....	8
3.2.4 系统冲激响应.....	8
3.2.5 不同激励信号下的系统响应.....	9
第 4 章 硬件测试.....	11
4.1 系统实物图	11
4.2 系统冲激响应与阶跃响应	11
4.2.1 系统阶跃响应.....	11
4.2.2 系统冲激响应.....	12
4.3 不同激励信号下的系统响应	12
4.4 系统幅频特性测试	14

第 1 章 方案选择

1.1 巴特沃斯滤波器的特性

巴特沃斯滤波器是电子滤波器的一种。巴特沃斯滤波器的特点是通频带的频率响应曲线最平滑。这种滤波器最先由英国工程师斯替芬·巴特沃斯（Stephen Butterworth）在 1930 年发表在英国《无线电工程》期刊的一篇论文中提出的。

巴特沃斯低通滤波器可用如下振幅的平方对频率的公式表示：

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} = \frac{1}{1 + \epsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n}} \quad (1)$$

其中,

n = 滤波器的阶数

ω_c = 截止频率 = 振幅下降为-3db 时的频率

ω_p = 通频带边缘频率

$\frac{1}{1 + \epsilon^2} = |H(\omega)|^2$ 为在通频带边缘的数值

1.2 使用 Filter Solutions 软件生成滤波器设计方案

Filter Solutions 是美国 Nuhertz 公司开发的一款基于 PC 平台的滤波器综合、分析软件包。本文将使用 Filter Solutions 生成滤波器电路。

根据设计要求在软件中选择巴特沃斯滤波器，高通，通频带 500Khz, 二阶无源，并进行滤波器生成。可以得到以下结果：

电路图如图 1.1 所示：

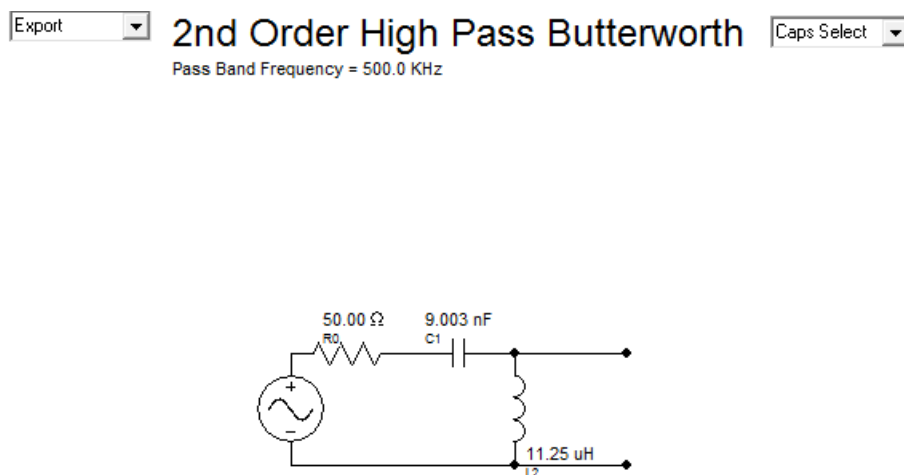


图 1.1

传递函数如图 1.2 所示：

Continuous Transfer Function

$$\frac{s^2}{s^2 + 4.443e+06s + 9.87e+12}$$

2nd Order High Pass Butterworth

Pass Band Frequency = 500.0 KHz

Sun Jun 11 10:54 2017

图 1.2

特性曲线如图 1.3 所示：

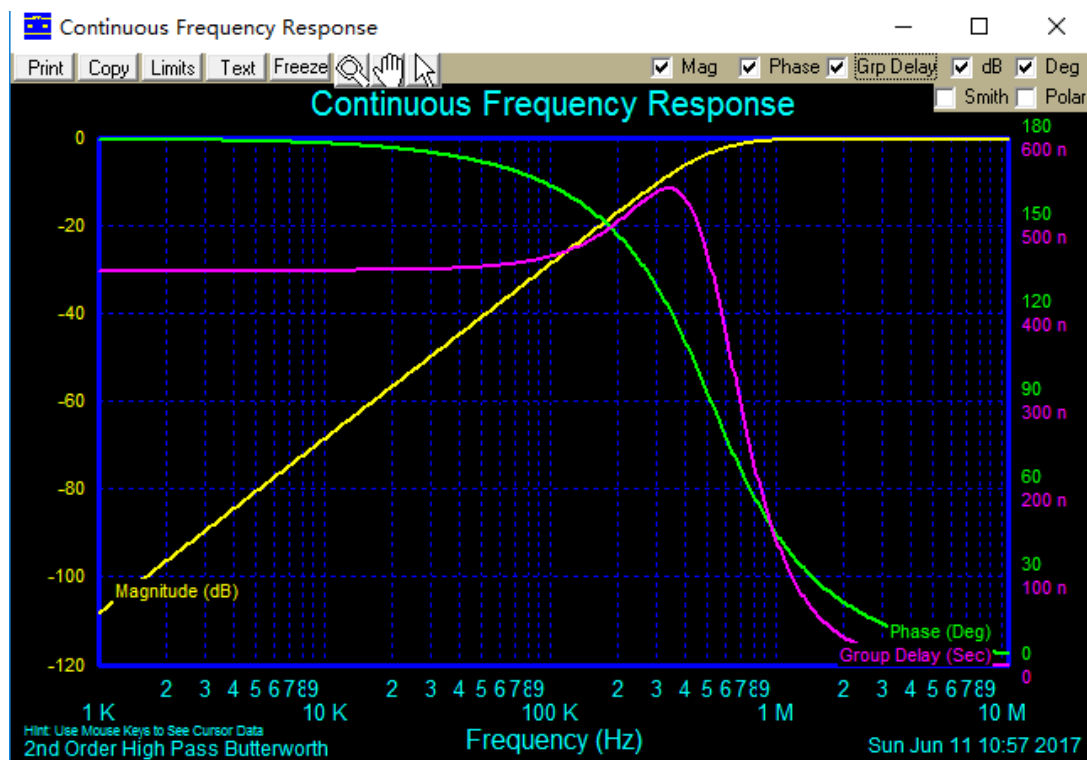


图 1.3

通过特性曲线图可以看出该方案完全可以实现通频带为 500Khz 的高通滤波器设计，而且在通带范围极为平稳，在阻带范围内以每倍频 12db 的速度衰减。

1.3 结合实际情况对方案进行调整

由于实际中并不存在 $50\ \Omega$ 的电阻、 9.003nf 的电容以及 11.25uh 的电感，故使用 $47\ \Omega$ 电阻 10nf 的电感以及 10uh 的电感进行替换。

替换后的电路图如下：

2nd Order High Pass Butterworth
Pass Band Frequency = 500.0 KHz

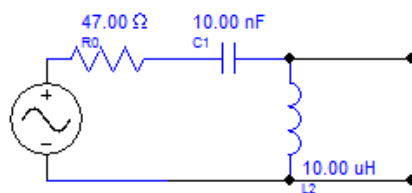


图 1.4

替换后的特性曲线如下：

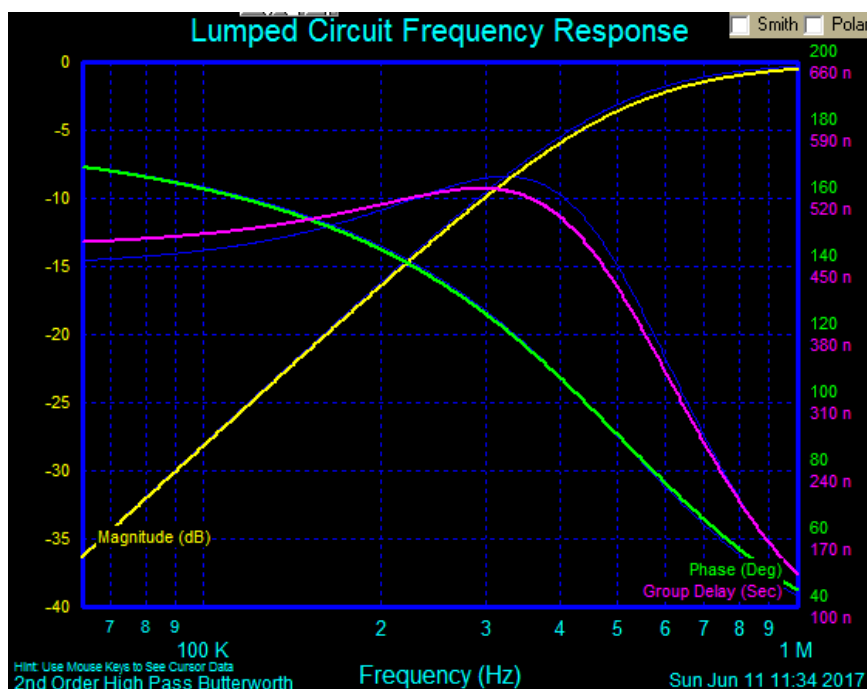


图 1.5

根据修改参数后的特性图，可以发现修改后的参数与原始参数在性能上十分接近，在误差允许范围内，可以实现对原有参数的替换。

第 2 章 理论计算

2.1 传递函数及其推导

电路图如下：

2nd Order High Pass Butterworth
Pass Band Frequency = 500.0 KHz

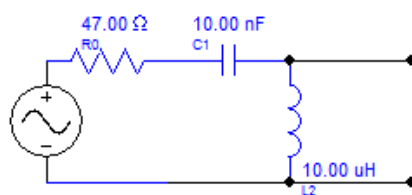


图 2.1

由分压公式得：

$$V_O = \frac{Z_L}{Z_C + Z_R + Z_L} V_i \quad (2)$$

S 域变换得：

$$V_O = \frac{LS}{\frac{1}{SC} + R + LS} V_i \quad (\text{其中 } S = j\omega) \quad (3)$$

化简得：

$$V_O = \frac{S^2}{S^2 + \frac{R}{L}S + \frac{1}{CL}} V_i \quad (4)$$

故传递函数：

$$H(S) = \frac{S^2}{S^2 + \frac{R}{L}S + \frac{1}{CL}} \quad (5)$$

带入器件参数得：

$$H(s) = \frac{S^2}{S^2 + 4.7 \times 10^6 S + 1 \times 10^{13}} \quad (6)$$

2.2 使用 Matlab 对传递函数进行检验

将传递函数（6）使用 Matlab 进行绘图操作，得到以下结果：

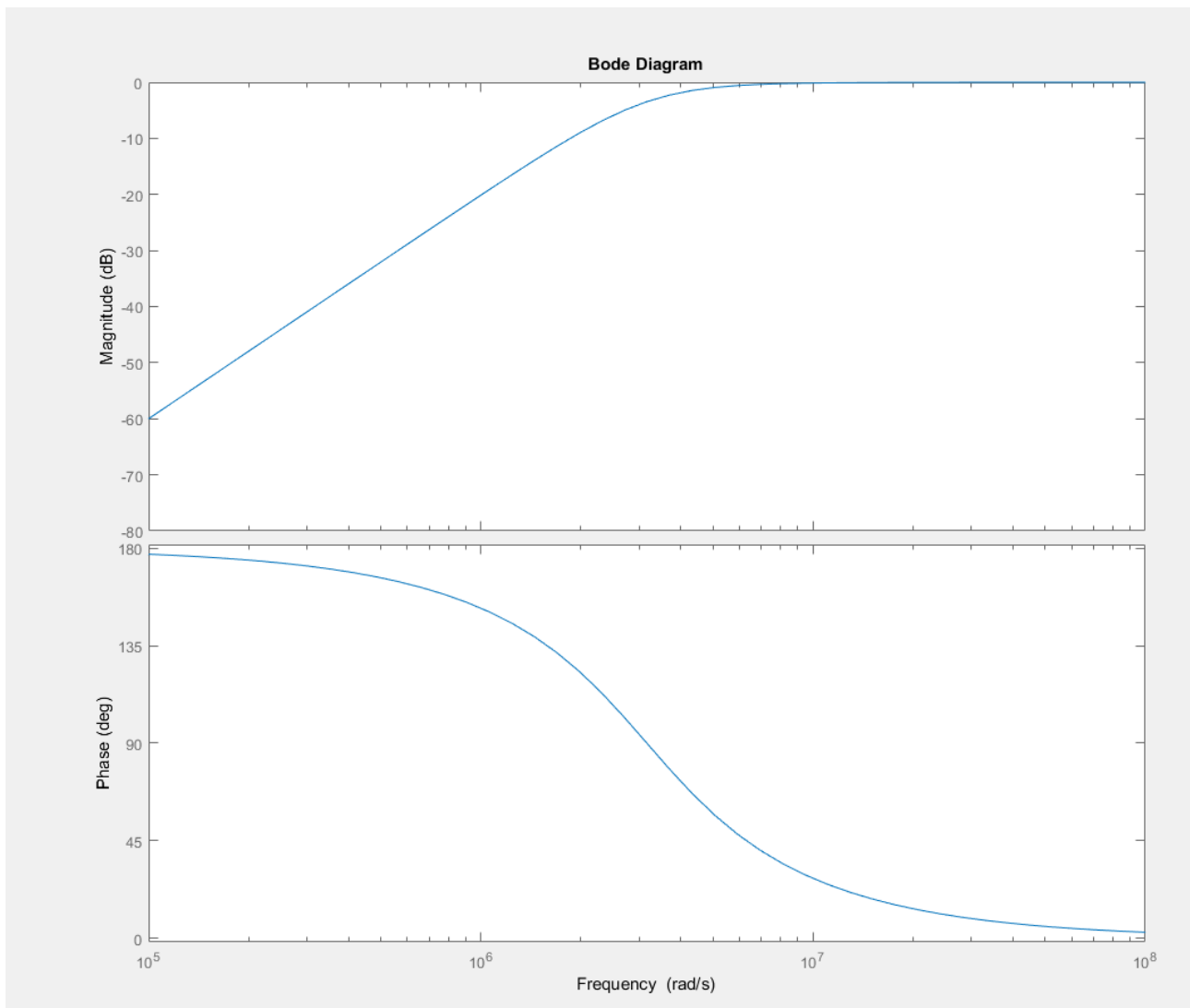


图 2.2

从图中可以看出当 $\omega_0 = 3.142 \times 10^6$ (f=500KHz) 时输出信号衰减接近 3db，证明传递函数计算正确，同时证明方案可行性强。

第 3 章 软件仿真

3.1 使用 Matlab 进行仿真

3.1.1 系统阶跃响应

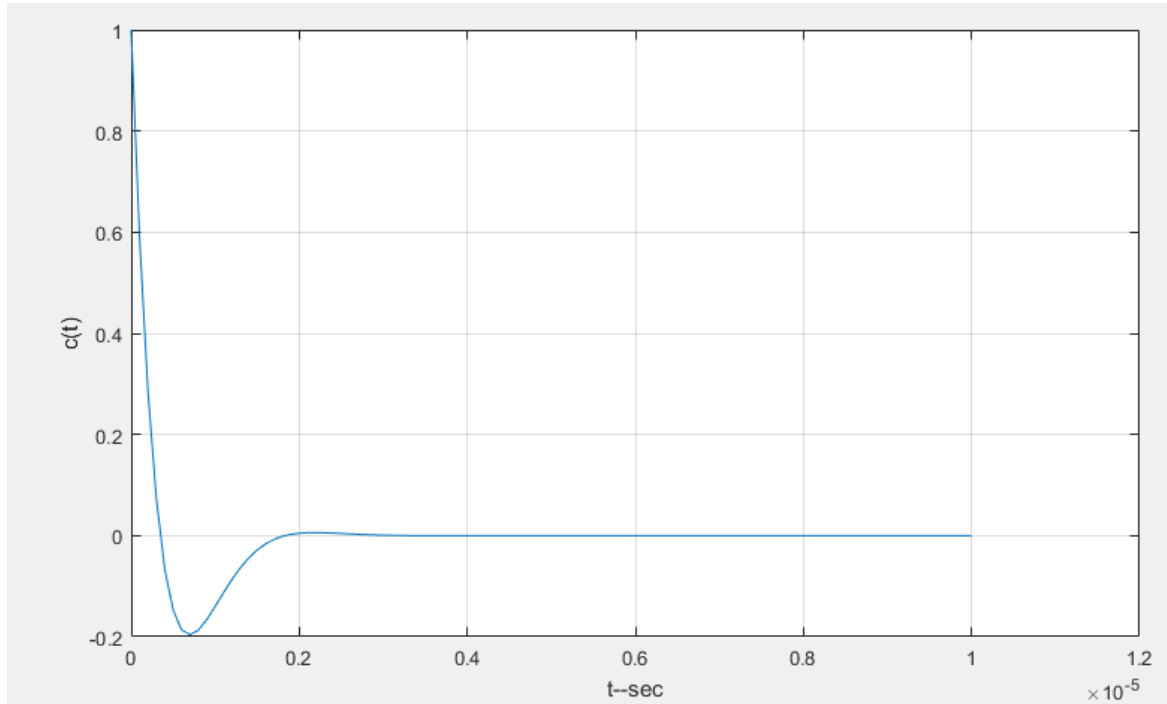


图 3.1

3.1.2 系统冲激响应

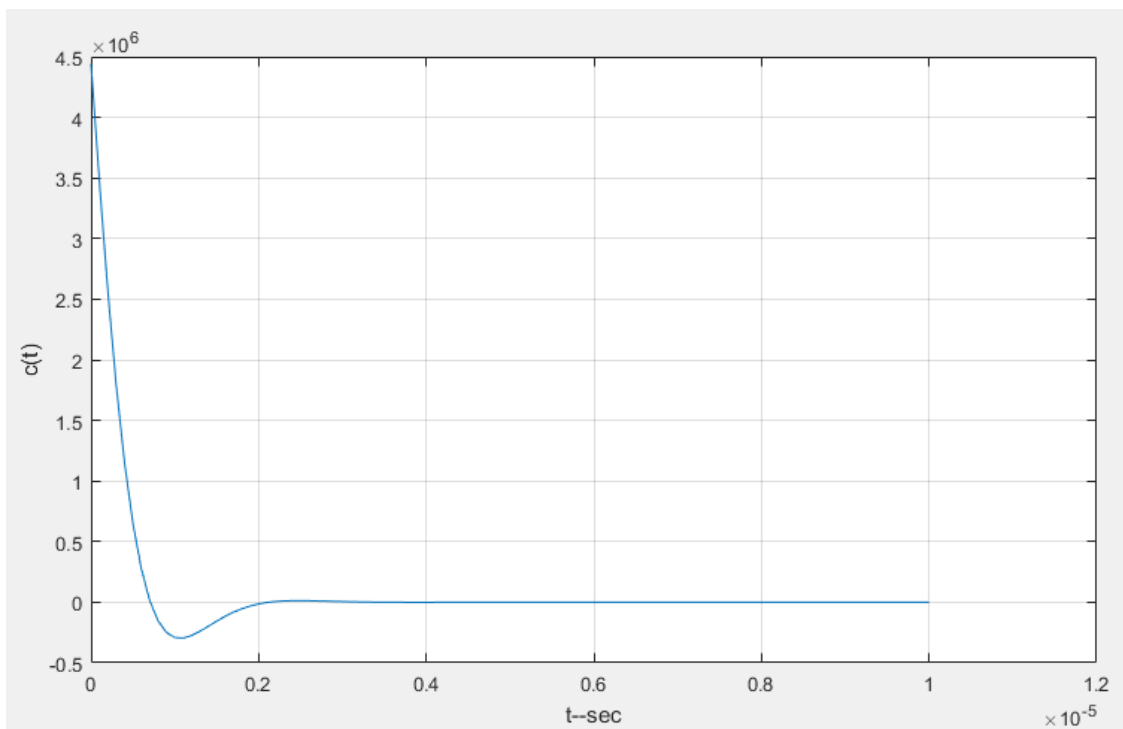


图 3.2

3.2 使用 Proteus 进行仿真

3.2.1 系统原理图

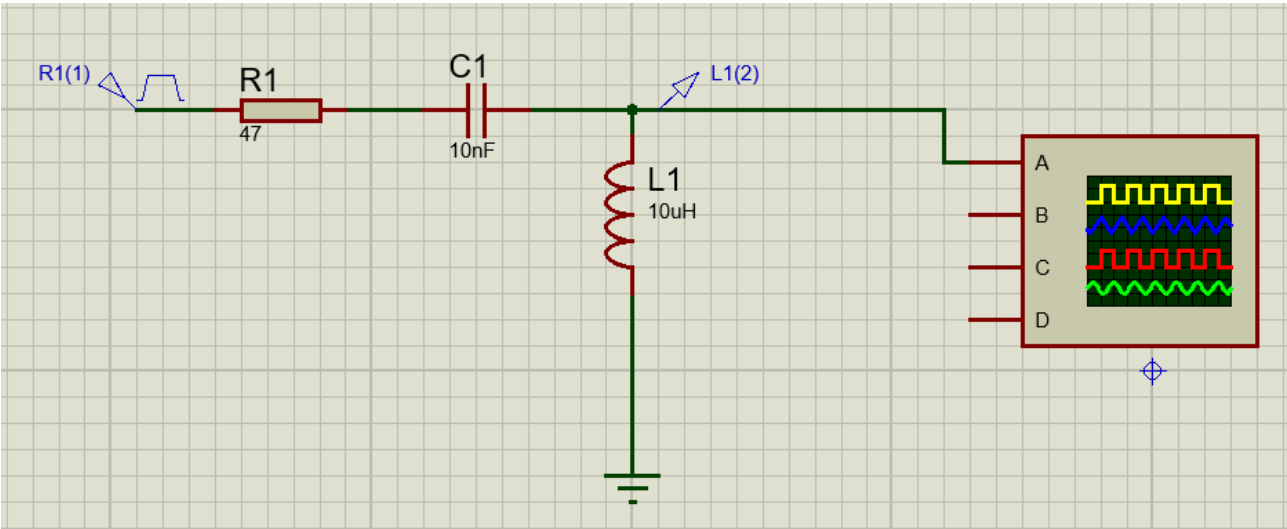


图 3.3

3.2.2 系统幅频特性以及相频特性

采用 Proteus 软件的 AC SWEEP ANALYSIS 可以很容易的得到电路的幅频特性以及相频特性，仿真结果如下：

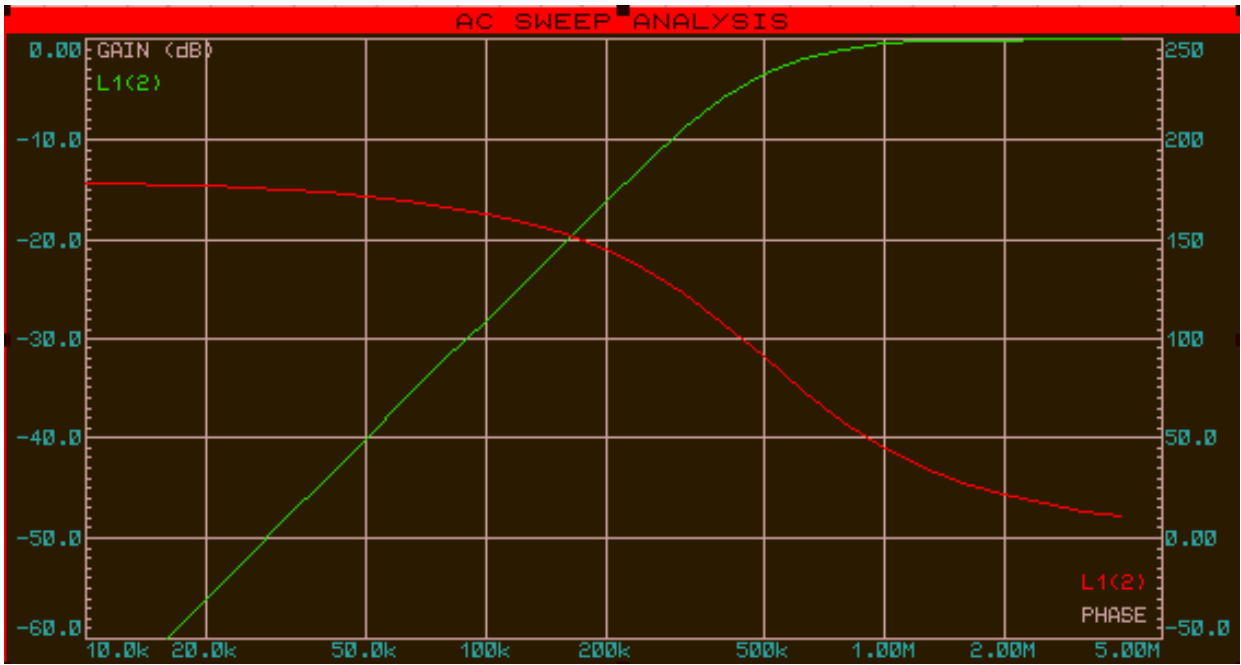


图 3.4

通过仿真结果可以很直观的看出该高通滤波器的通频带为 500Khz, 满足设计要求。

3.2.3 系统阶跃响应

由于软件中的单次阶跃信号示波器无法进行稳定的采集，因此采取 $f=1\text{Hz}$, $V_{pp}=1\text{V}$ ，占空比 50% 的方波代替阶跃信号。

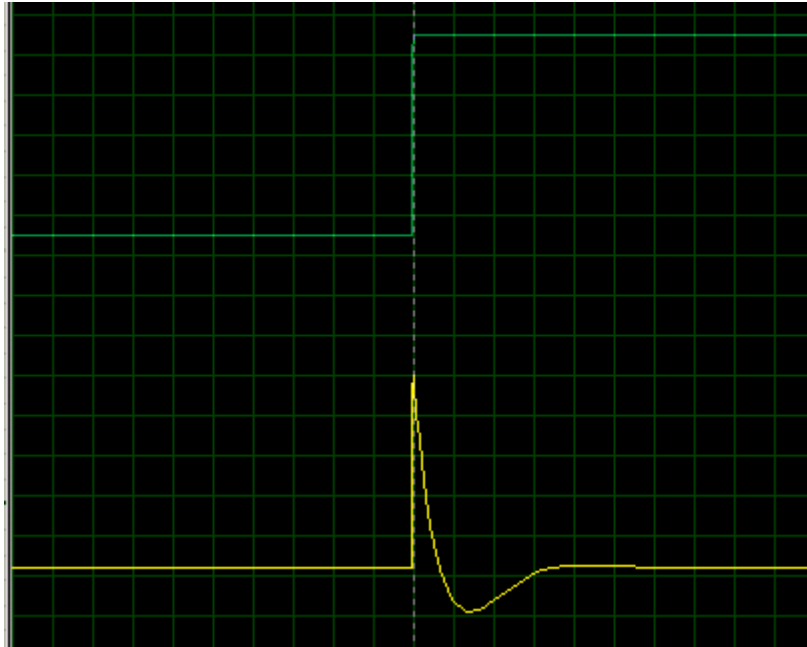


图 3.5

仿真结果与 Matlab 类似。

3.2.4 系统冲激响应

由于软件中的单次冲激信号示波器无法进行稳定的采集，因此采取 $f=10\text{KHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$ ，占空比 0.1% 的脉冲波代替冲激信号。

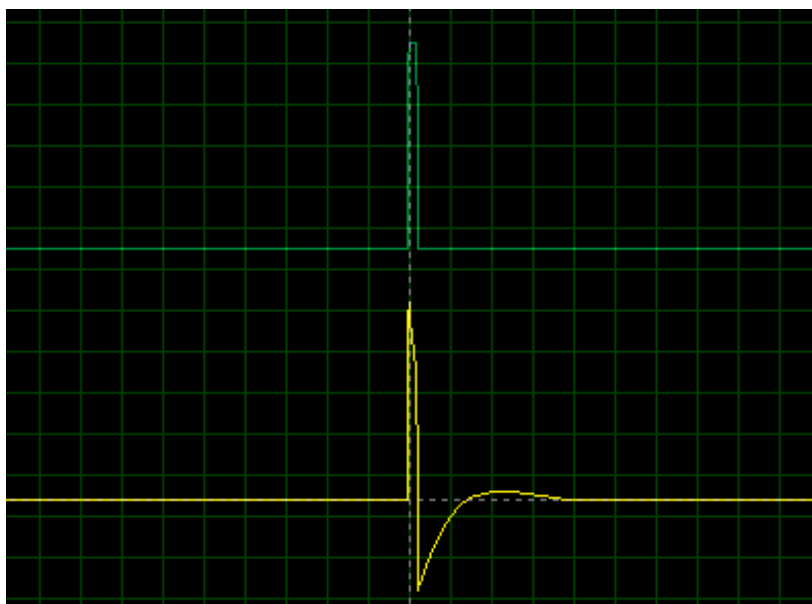


图 3.6

观察仿真结果，可以发现与 Matlab 的结果出现了明显的差异，这可能是由于由信号发生器模拟的冲激信号与理想状态下的冲激函数有较大差距导致这种现象的产生。

3.2.5 不同激励信号下的系统响应

$f=500\text{KHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$, 正弦信号: (CHA: 系统输出 CHD: 系统输入)

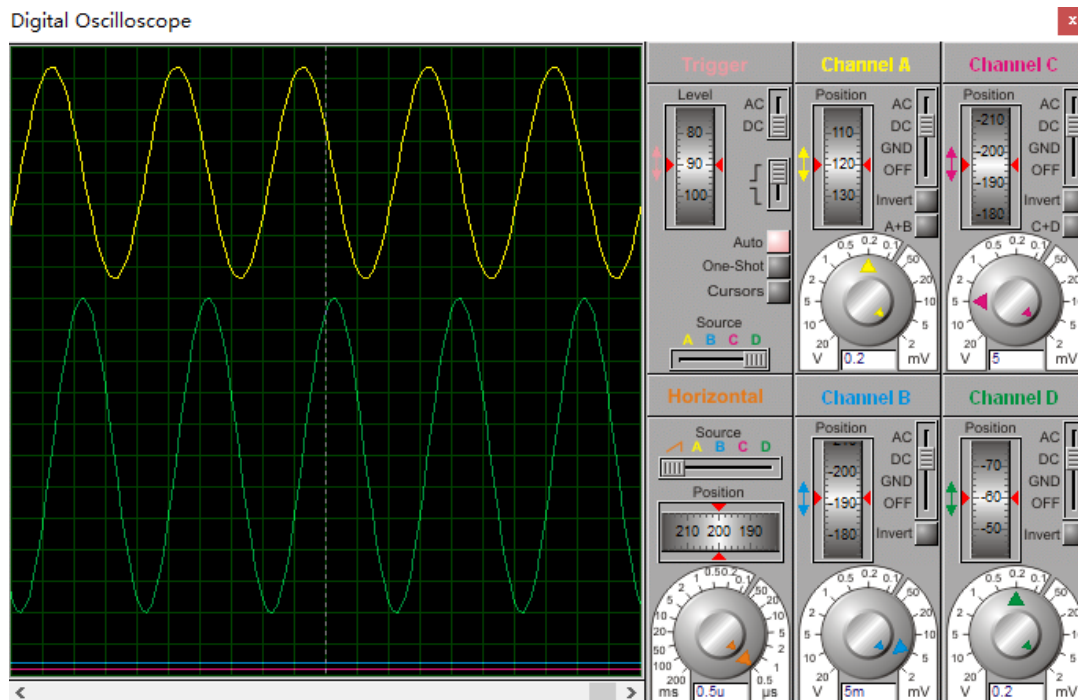


图 3.7

$f=1\text{MHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$, 正弦信号: (CHA: 系统输出 CHD: 系统输入)

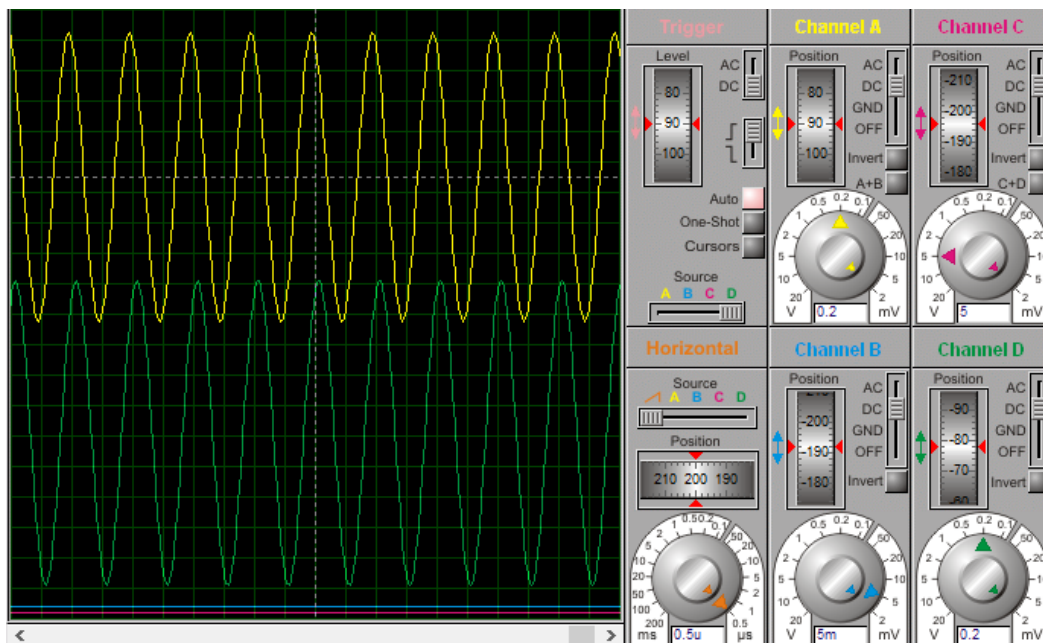


图 3.8

$f=100\text{KHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$, 方波信号: (CHA: 系统输出 CHD: 系统输入)

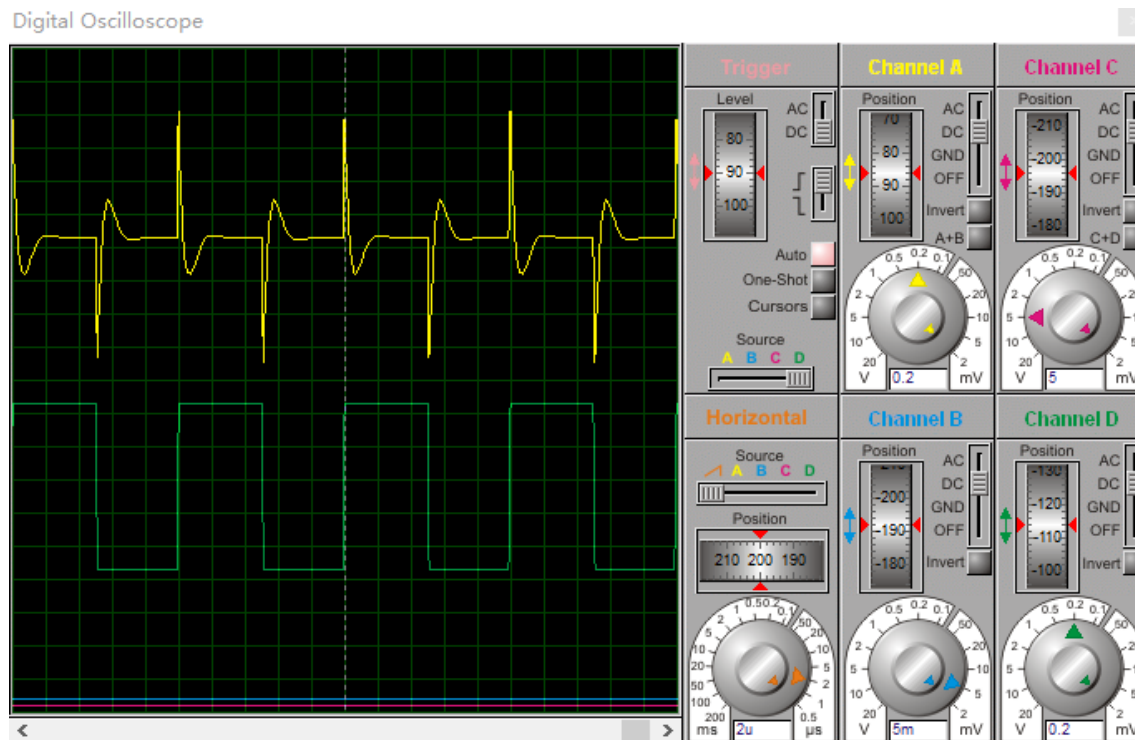


图 3.9

$f=100\text{KHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$, 三角波信号: (CHA: 系统输出 CHD: 系统输入)

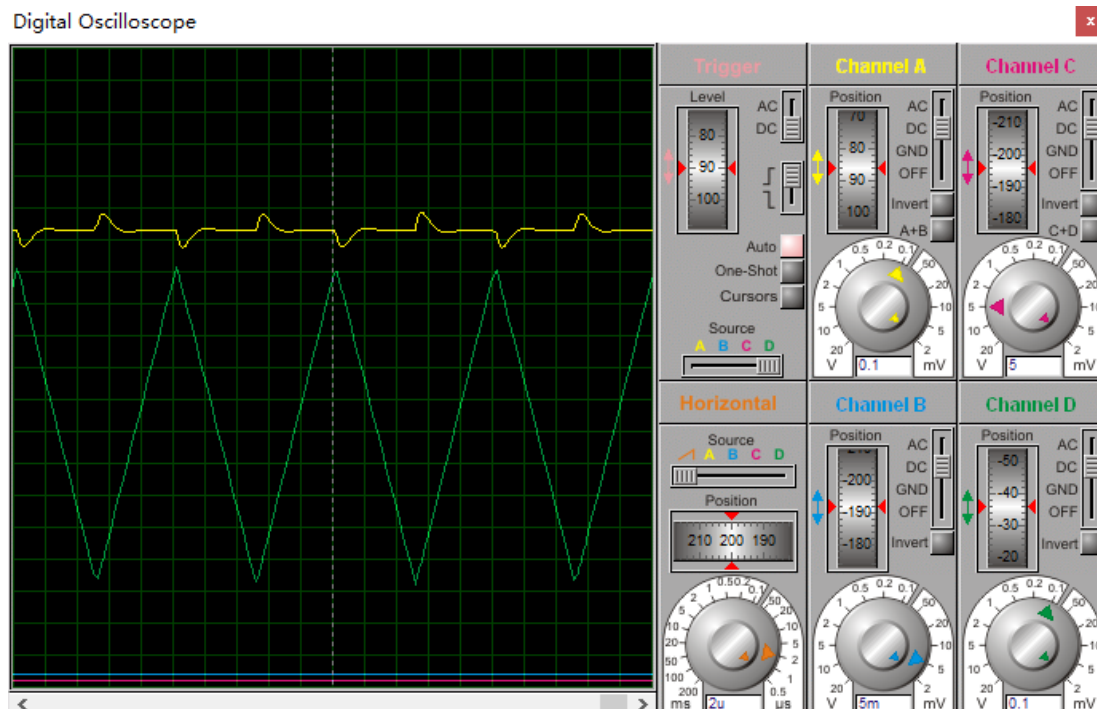


图 3.10

第 4 章 硬件测试

4.1 系统实物图

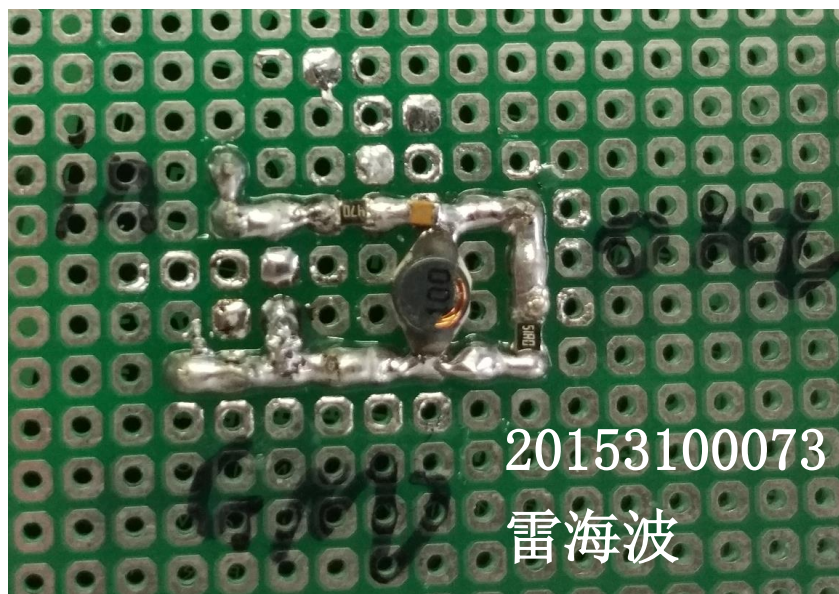


图 4.1

4.2 系统冲激响应与阶跃响应

4.2.1 系统阶跃响应

由于信号发生器产生的单次阶跃信号示波器无法进行稳定的采集，因此采取 $f=1\text{Hz}$, $V_{pp}=1\text{V}$ ，占空比 50% 的方波代替阶跃信号。示波器显示结果如下：

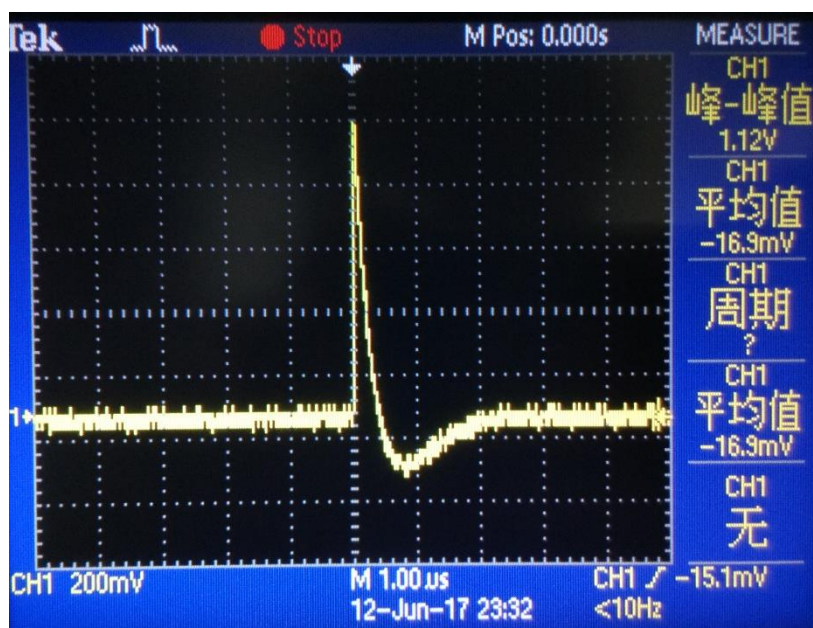


图 4.2

4.2.2 系统冲激响应

由于信号发生器无法产生理想的冲激信号,因此采取 $f=10\text{kHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$, 占空比 0.1% 的脉冲波代替理想冲激信号。结果如下:

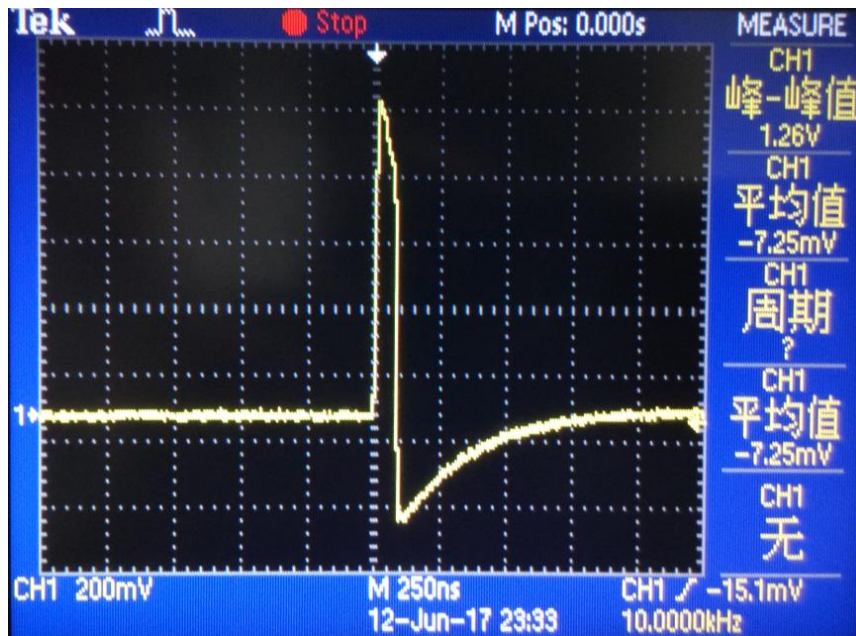


图 4.3

4.3 不同激励信号下的系统响应

激励: $f=500\text{kHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$, 正弦信号

系统响应:

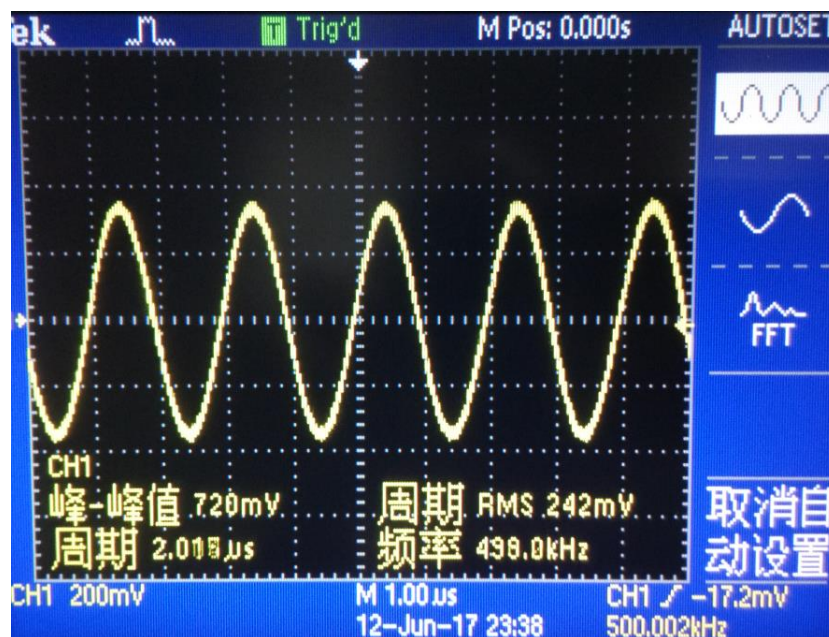


图 4.4

激励: $f=1\text{MHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$, 正弦信号

系统响应:

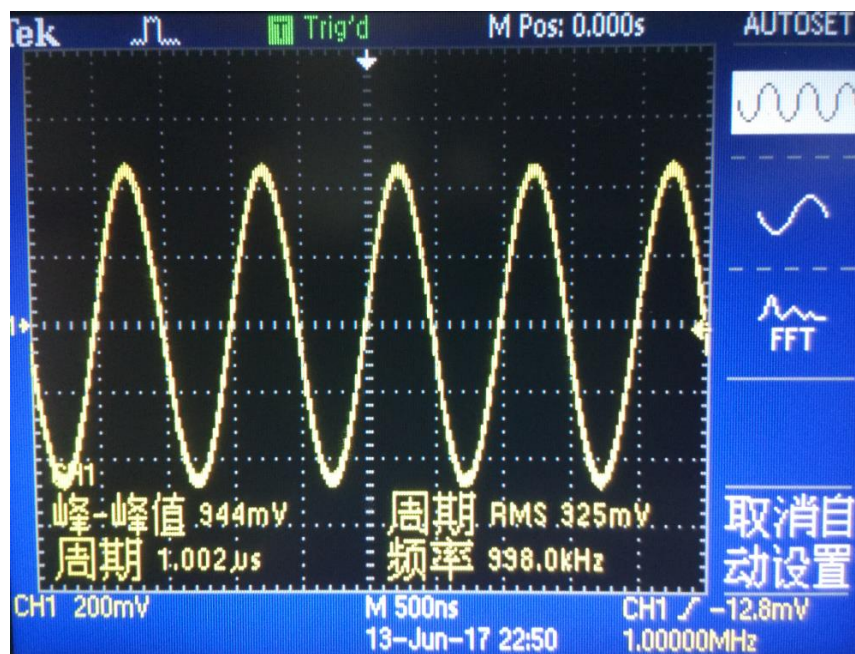


图 4.5

激励: $f=100\text{kHz}$, $V_{pp}=1\text{V}$, 方波信号

系统响应:

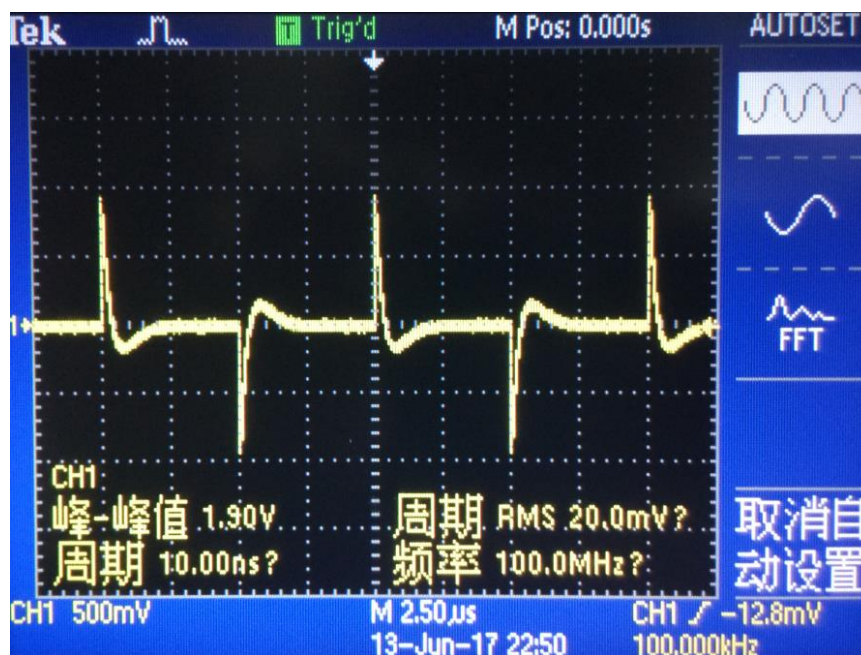


图 4.6

激励：f=100KHz，V_{pp}=1V，三角波信号

系统响应：

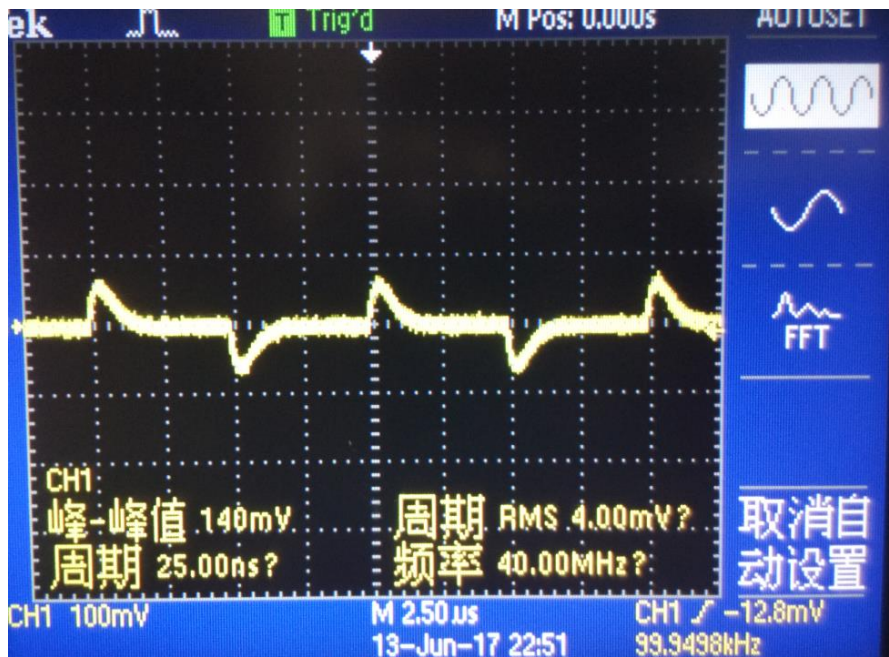


图 4. 7

实际电路测试结果与仿真结果类似。

4. 4 系统幅频特性测试

输入 V_{pp}=1V 的正弦波，输出波形幅度与频率的关系如表 4. 1 所示。

频率 (KHz)	50	100	200	300	400	500	700	900	1500	10000
幅度 (mv)	26. 4	68. 4	204	378	540	672	832	920	1020	1050

表 4. 1

将上述数据使用 Matlab 进行绘图，得到幅频特性曲线如图 4. 8 所示。

同时，Matlab 脚本如下：

```
>> x=[50e03, 100e03, 200e03, 300e03, 400e03, 500e03, 700e03, 900e03, 1. 5e06, 10e06];  
>> y=[26. 4, 68. 4, 204, 378, 540, 672, 832, 920, 1020, 1060];  
>> y=20*log10(y./1000);  
>> xlabel(' 频率'), ylabel(' dB');  
>> semilogx(x, y)
```

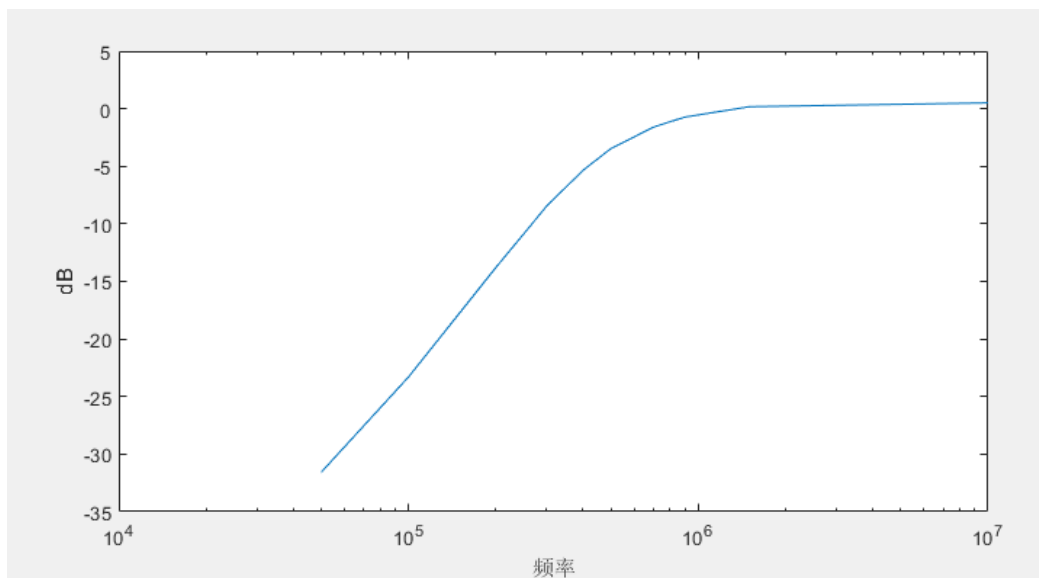


图 4. 8

对比图 2. 2 及图 3. 4 可以发现仿真结果与实际电路测试结果一致。