

南京大学 模拟电路实验

实验二 由运放构成的基本运算电路、振荡器、滤波器 实验报告

姓	名：	高荧泽
学	号：	231880318
院	系：	集成电路学院
邮	箱：	yz.gao@outlook.com
班	级：	科创大厦 A323
任 课 教 师：		方元

实验二 由运放构成的基本运算电路、振荡器、滤波器

摘要

本实验以运算放大器为核心，系统研究了基本运算电路、振荡器与滤波器的设计与特性验证。完成了反相/同相放大器、微分/积分器、方波/三角波/正弦波发生器，以及四类滤波器的参数测量与理论分析。

关键词：运算放大器；滤波器设计；振荡器；频响特性

目录

摘要	1
一、实验原理与目的	3
1.1 实验原理	3
1.1.1 由运放构成的基本运算电路	3
1.1.2 由运放构成的震荡电路	3
1.1.3 由运放构成的滤波器	3
1.2 实验目的	4
1.2.1 由运放构成的基本运算电路	4
1.2.2 由运放构成的震荡电路	4
1.2.3 由运放构成的滤波器	4
二、实验软件环境说明与数据约定	4
2.1 软件环境	4
2.2 数据约定	4
三、实验内容与数据分析	4
3.1 由运放构成的基本运算电路	5
3.1.1 反相放大器	5
3.1.2 同相放大器	5
3.1.3 微分器	8
3.1.4 积分器	9
3.2 由运放构成的震荡电路	10
3.2.1 一般方波发生器	10
3.2.2 占空比可调的方波发生器	11
3.2.3 三角波发生电路	12
3.2.4 正弦波发生电路	13
3.3 由运放构成的滤波器	14
3.3.1 压控电压源型二阶有源低通滤波电路	14
3.3.2 压控电压源型二阶高通滤波电路	16
3.3.3 有源带通滤波电路	17
3.3.4 有源带阻滤波电路	19
四、误差分析	20
4.1 交流小信号的测量误差	20
4.2 示波器 FFT 图像不稳	20
4.3 实验条件限制	20
五、总结	21
致谢	22
附件	23
参考文献	24

一、实验原理与目的

1.1 实验原理

具体电路的原理将在第三部分数据分析中进行说明,在此只对各部分的基本原理作简要概括。

1.1.1 由运放构成的基本运算电路

运算放大器的图形符号如图 1.1.1 所示。

自然的,由运放构成的基本运算电路的核心即为运算放大器。运算放大器是一种放大倍数极高的电路单元。由于其过高的放大倍数,基本不能直接使用,但常与反馈网络一起组成一定的功能模块,从而实现加法、减法、微分和积分等数学运算。理想运放具有“虚短”、“虚断”、“输入电阻无穷大”等理想特性。

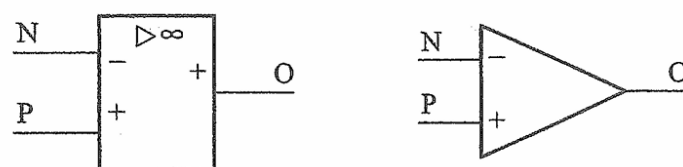


图 1.1.1 运放的图形符号

1.1.2 由运放构成的振荡电路

由运算放大器构成的振荡电路通过正反馈和选频网络的协同作用实现自激振荡,其核心原理是满足巴克豪森准则:在目标振荡频率下,环路的总增益必须满足幅度条件 $|A\beta| = 1$ 和相位条件 $\angle A\beta = 2n\pi$ (n 为整数)。运放作为核心放大元件,其开环增益 A 与正反馈网络的反馈系数 β 共同构成环路增益 $A\beta$ 。正反馈网络(如 RC 串并联、LC 电路或相移网络)负责选择特定频率,并在该频率处引入所需的相移(如文氏桥的 0° 相移),与运放自身的相移(如反相放大器的 180°)叠加形成总相移 360° ,从而建立正反馈路径。起振时,环路增益需略大于 1,使得电路能够放大初始噪声或扰动信号;随着振幅增大,非线性稳幅机制(如二极管限幅、热敏电阻或 JFET 自动增益控制)通过调节负反馈网络的等效阻抗,逐渐降低环路增益至 1,最终稳定输出幅值并抑制波形失真。典型电路包括:

1. 文氏桥正弦波振荡器

由 RC 串并网络(正反馈)和电阻分压负反馈组成,要求运放闭环增益 $A \geq 3$ 以满足起振条件;

文氏电桥是本次实验中常用的振荡结构,其振荡频率在式 1-1 中给出。

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1-1)$$

2. 相移振荡器

通过多级 RC 电路累积 180° 相移,结合运放反相放大实现总相移 360° ;

3. 弛豫振荡器

利用 RC 充放电与迟滞比较器切换运放输出状态,生成方波或三角波。

1.1.3 由运放构成的滤波器

由运放构成的滤波器利用 RC 网络与运放的放大、阻抗变换特性,通过调节频率响应实

现信号筛选。其核心原理是：运放与电阻、电容构成负反馈回路，通过式 1-2 描述的传递函数定义滤波特性。

$$H(s) = V_{out}/V_{in} \quad (1-2)$$

例如，一阶低通滤波器的传递函数如式 1-3 所示。而高阶滤波器，如二阶滤波器的传递函数如式 1-4 所示。

$$H(s) = \frac{1}{1 + sRC} \quad \left(\text{截止频率 } f_c = \frac{1}{2\pi RC} \right) \quad (1-3)$$

$$H(s) = \frac{-R_2/R_1}{1 + sR_2C + (sR_2C)^2} \quad (1-4)$$

1.2 实验目的

1.2.1 由运放构成的基本运算电路

了解由运放构成的同相、反相运算电路和积分器、微分器的工作原理以及工作特点，测量其幅频特性等重要参数。

1.2.2 由运放构成的震荡电路

学习使用运算放大器搭建方波发生器、矩形波发生器和三角波发生器，并分析波形发生器工作原理，了解输出波形的占空比与哪些电路参数有关以及如何控制目标波形占空比。

1.2.3 由运放构成的滤波器

学习使用运算放大器搭建二阶低通滤波电路、二阶高通滤波电路、二阶带通滤波电路和双 T 网络二阶带阻滤波电路。了解高阶滤波器的工作原理，了解滤波器在中心频率附近的特性，测量四种滤波器的频响特性。

二、实验软件环境说明与数据约定

2.1 软件环境

仿真软件：NI Multisim 14.3 Education Edition

数据处理：OriginPro 2025 (64-bit) SR1 10.2.0.196 (Education Edition)

2.2 数据约定

在本报告中，若无特殊说明，交流电压记录均为峰-峰值(V_{pp})。

三、实验内容与数据分析

本实验主要分为三个部分，分别对运放构成的基本运算电路、震荡电路、滤波器的主要参数及特性进行测量、验证和分析。本部分旨在展示实验测量得到的真实数据，并对归纳整合后的实验数据进行分析，必要时给出公式或图表，以证明数据的合理性。同时，也对模拟电路的相关理论进行验证。

实验中，统一使用实验箱中的电路资源，采用双电源±12V 直流供电。

3.1 由运放构成的基本运算电路

3.1.1 反相放大器

由运放构成的反相放大器如图 3.1.1 所示。对反相放大器的频响特性和输入、输出电阻进行测量。

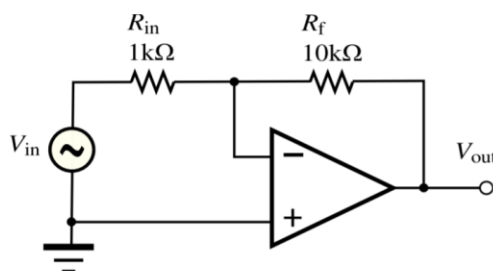


图 3.1.1 反相放大器

1. 测量方法

根据图 3.1.1 所示电路图连接电路。

首先对反相放大电路的频率响应特点进行测量设置信号发生器保持 1V 正弦波输出，改变信号频率。使用双踪示波器测量不同频率输入条件下 V_{out} 端口的输出波形，记录输出电压峰-峰值。根据式 3-1 即可计算电压增益，进而整理数据，绘制图像得到频响特性。

$$Gain = 20 \lg(v_{out}/v_{in}) \quad (3-1)$$

反相放大电路输入、输出电阻的测量方法在《实验一 双极结型晶体管 (BJT)》的 3.1.3 节中已有叙述^[1]，在此不做赘述。如需查阅，参考文献中已给出相关链接，可供查询。

2. 实验数据

对运放构成的反相放大器频率响应（幅频特性）的测量结果如表 3.1.1 所示，其中-3dB 点用灰色荧光标示。其幅频特性曲线如图 3.1.2 所示。

经实验测量，反相放大器的输入电阻约为 1.01kΩ，输出电阻约为 4.52Ω。

3. 数据分析

理论分析，运放构成的反相放大电路的电压增益 A_v 为

$$A_v = R_f/R_{in} \quad (3-2)$$

在图 3.1.1 所示的电路中，根据式 3-2 可计算得到电压增益 $A_v=10$ ，与实验测量结果相符合。

对于输入、输出电阻，根据理想运放“虚短”和“虚断”的特点，其输入电阻即为 $R_{in}=1k\Omega$ ，而输出电阻约为 0，亦与测量结果相符合。

3.1.2 同相放大器

由运放构成的同向放大器电路图如图 3.1.3 所示。同样的，对同相放大器的频响特性和输入、输出电阻进行测量。

1. 测量方法

根据图 3.1.3 所示电路图连接电路。除需要设定信号源输出 100mV 正弦交流信号外，测量方法与 3.1.1 节中所述方法相同，在此不做赘述。

2. 实验数据

对运放构成的同相放大电路频率响应的测量结果如表 3.1.2 所示，其中-3dB 点用灰色荧光标示。其幅频响应图像如图 3.1.4 所示。通频带电压增益约为 104。

经实验测量，反相放大器的输入电阻为 ∞ ，输出电阻约为 0。

表 3.1.1 反相放大器频率响应

F(Hz)	v_i (V)	v_o (V)	Gain(dB)
50	1	9.84	19.86
100	1	10	20
200	1	10	20
500	1	9.92	19.93
1k	1	10	20
2k	1	10	20
10k	1	10	20
20k	1	9.6	19.65
40k	1	4.32	18.69
74k	1	1.42	17.02
100k	1	1.2	15.50
500k	1	0.21	6.40
1M	1	0.1	0

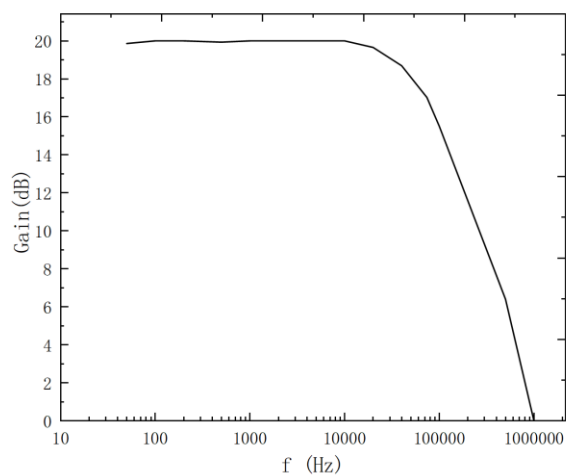


图 3.1.2 反相放大器幅频响应

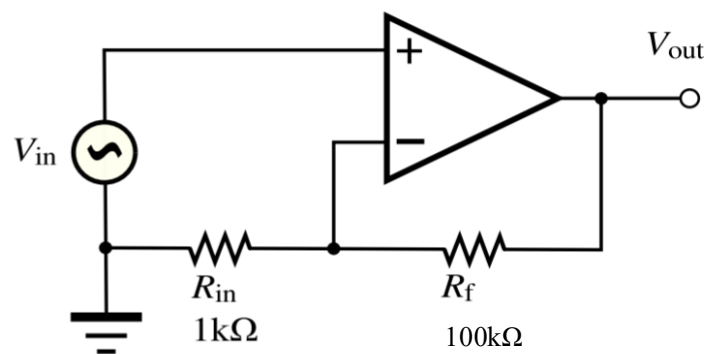


图 3.1.3 同相放大电路

3. 数据分析

对于频率响应部分，根据 $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$ 进行理论计算，同相放大电路通频带电压增益 $A_v=101$ ，与实验测量结果的 104 基本一致，可以认为测量正确，理论分析与实验测量相互验证。

对于输入、输出电阻，理论分析可知，由于理想运放“虚断”特性，其输入电阻为 ∞ 。而对于输出端，相当于一个理想的受控电压源，故输出电阻的理论值约为 0。故测量结果与理论分析相互验证，可以认为测量准确。

表 3.1.2 同相放大器频率响应

F(Hz)	v_i (mV)	v_o (V)	Gain(dB)
50	100	10.4	40.34
100	100	10.4	40.34
200	100	10.4	40.34
500	100	10.4	40.34
1k	100	10.4	40.34
2k	100	10.12	40.10
5k	100	8.8	38.8
8k	100	7.32	37.29
10k	100	6.52	36.28
50k	100	1.6	24
100k	100	0.80	18.06
1M	100	0.13	2.28

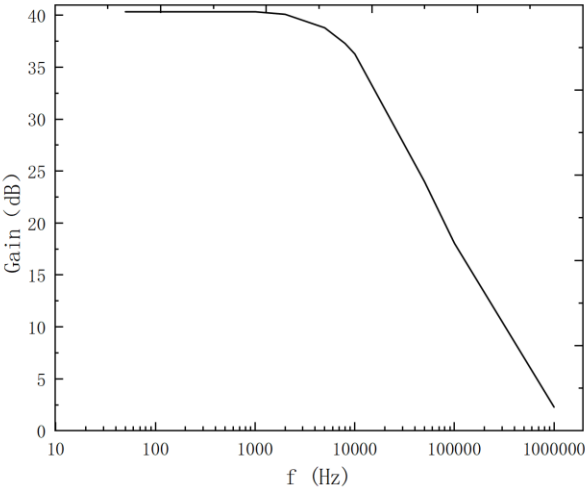


图 3.1.4 同相放大器幅频曲线

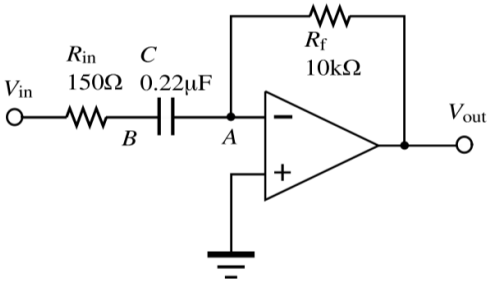


图 3.1.5 微分器

3.1.3 微分器

由运放构成的微分器电路图如图 3.1.5 所示。

本部分旨在对运放构成的微分器的频率响应特点进行测量，以及探究 100mV_{pp} 三角波输入条件下，输出信号在何频率下达到饱和。

1. 测量方法

微分器的运算功能正如其名，是输出输入信号的微分运算结果。故如果输入信号为三角波，输出信号应该是近似方波，这样的输入、输出信号选取最能体现微分器的功能特点。但本实验中，为了测量微分器的频率响应，需设置输入信号为正弦波。微分器频响特性的测量方法与 3.1.2 节中的叙述相同，在此不做赘述。

为测量 100mV_{pp} 三角波信号输入条件下，在输入信号为何种频率下输出信号达到饱和，只需设置信号源输出 100mV_{pp} 三角波，改变其频率，用双踪示波器观察输出信号波形在何频率下达到饱和即可。

2. 实验数据

微分器频响测量结果如表 3.1.3 所示，-3dB 点用灰色荧光标示。其幅频曲线如图 3.1.6 所示。

设定输入信号为 100mV 三角波，改变其频率，观察输出信号波形。根据观察，在输出信号达到饱和之前就已经发生失真，失真频率约为 $2.4\sim 3.6\text{kHz}$ 。若不考虑失真的影响，输出信号约在 7.5kHz 频率条件下达到饱和。

表 3.1.3 微分器频率响应

F(Hz)	$v_i(\text{mV})$	$v_o(\text{V})$	Gain(dB)
50	100	62m	-4.15
100	100	0.13	2.28
200	100	0.64	16.12
500	100	1.29	22.21
1k	100	2.41	27.64
2k	100	3.52	30.93
3.1k	100	4.14	32.34
5k	100	4.6	33.26
10k	100	5	33.98
15k	100	4.27	32.61
20k	100	3.54	30.98
50k	100	1.56	23.86
100k	100	0.82	18.28

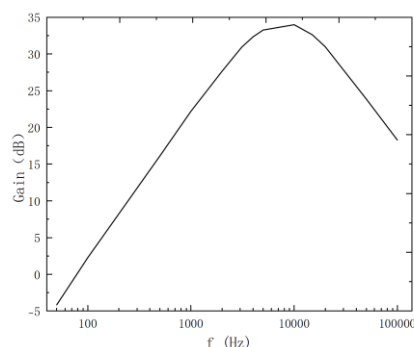


图 3.1.6 微分器幅频特性曲线

3. 数据分析

对运放构成的微分电路进行理论分析，若输入信号为 $v_i = \sin(\omega t)$ ，输出信号应为 $v_{out} = -RC\omega \cos(\omega t)$ ，这表明输出信号应随着输入信号频率的增加而增加。观察实验数据可知，在低频输入的情况下，这一线性特性有较好的体现。但输入信号频率过高时，由于运放自身的频响特性，电压增益反而随着频率的升高而下降。总之，测量结果与理论分析结果基本符合，可以认为测量正确。

3.1.4 积分器

由运放构成的积分器电路图如图 3.1.7 所示。然而，由于实验资源中没有电路图中所要求的 100pF 电容，在实验过程中用 0.01uF 电容代替。因此，根据理论分析可知，在本部分实验所展示的频率基础上乘以 100，对应电路图中使用 100pF 电容搭建电路所得的数据。

本部分实验旨在测量运放构成的积分器的频响特点，以及在输入 100mV_{pp} 方波条件下输出波形在何种频率下达到饱和。

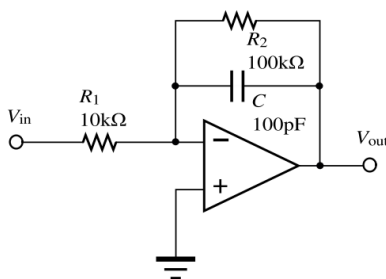


图 3.1.7 积分器

1. 测量方法

积分器频响特点和饱和频率的测量方法与 3.1.3 节中所述微分器相关特性的测量方法基本相同，在此不做赘述。只需注意测量饱和频率时，输入信号设定为方波即可。

2. 实验数据

积分器频响测量结果如表 3.1.4 所示，-3dB 点用灰色荧光标示。其幅频曲线如图 3.1.8 所示。

设定输入信号为 100mV 方波，改变其频率，观察输出信号波形。根据观察，在输出信号达到饱和之前就已经发生失真，失真频率约为 120~200Hz。

表 3.1.4 积分器频响特性

F(Hz)	v_i (mV)	v_o (V)	Gain(dB)
1	100	0.71	17.03
10	100	1	20
20	100	1	20
40	100	1	20
60	100	0.95	19.55
100	100	0.88	18.89
130	100	0.80	18.08
170	100	0.71	17.05
200	100	0.66	16.39
400	100	0.46	13.26
1k	100	0.24	7.60

3. 数据分析

对运放构成的积分器进行理论分析,当输入信号为 $v_i = \sin(\omega t)$ 时,输出信号应为 $v_{out} = -\frac{1}{RC\omega} \cos(\omega t)$,即电压增益会随着输入信号频率的增加而降低。观察表 3.1.4 所示的实验记录 and 图 3.1.8 所示的频响曲线可知,除 1Hz 频率点外,实验测量结果基本符合理论分析结果。而考虑 1Hz 处的较大误差,可能是由于低频下滤波器数据计算速度较慢,出现数据记录错误。

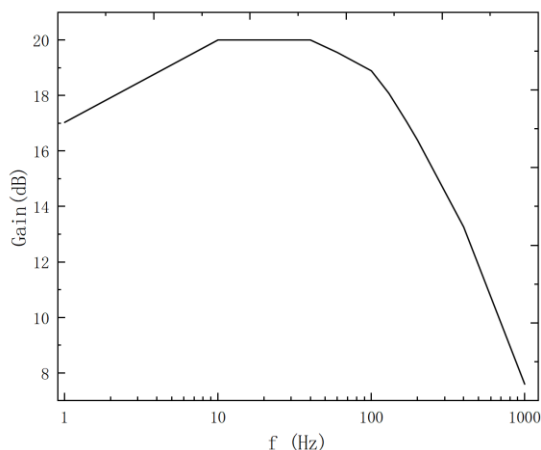


图 3.1.8 积分器频响曲线

3.2 由运放构成的振荡电路

3.2.1 一般方波发生器

由运放构成的方波发生器电路图如图 3.2.1 所示。本部分实验旨在验证方波发生器振荡频率的计算方法。

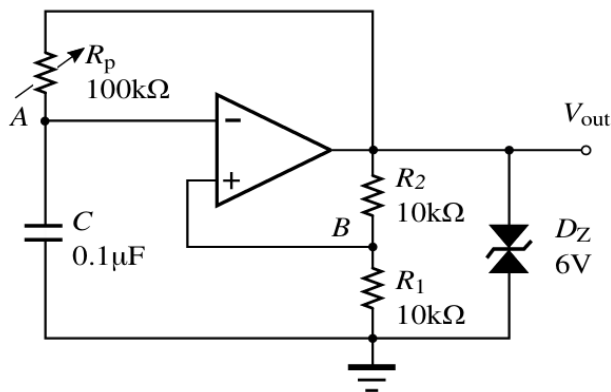


图 3.2.1 方波发生器

1. 测量方法

根据图 3.2.1 所示电路图连接电路。使用双踪示波器 CH1 探头测量电容 C 的电压波形,探头 CH2 测量输出电压波形。改变电位器阻值,观察示波器波形,记录振荡周期。

2. 实验数据

经测量,得到实验记录如表 3.2.1 所示。

表 3.2.1 方波发生器频率与电位器阻值关系

R_p (k Ω)	Amplitude(V_p)	T(ms, measure)	T(ms, calculate)
20	6	4.64	4.39
40	6	9.40	8.79
60	6	13.9	13.17
80	6	18.4	17.56
100	6	21.6	21.95

3. 数据分析

结合理想运放“虚短”“虚断”和基本电路原理，图 3.2.1 所示的方波发生器的振荡周期为

$$T_{\text{calculate}} = 2R_p C \ln(1 + 2R_2/R_1) \quad (3-3)$$

故结合电路图中数据，可计算得到振荡周期的理论值如表 3.2.1 中 T(ms, calculate)所示。比较可知，理论计算结果与实验测量结果基本符合，可以认为测量结果正确。

理论值与计算值之间的误差可能来源于实验使用元件的数值不够准确，实际值与标称值误差较大。

3.2.2 占空比可调的方波发生器

占空比可调的方波发生器电路图如图 3.2.2 所示。实验旨在探究电位器阻值对输出方波占空比的调控情况。

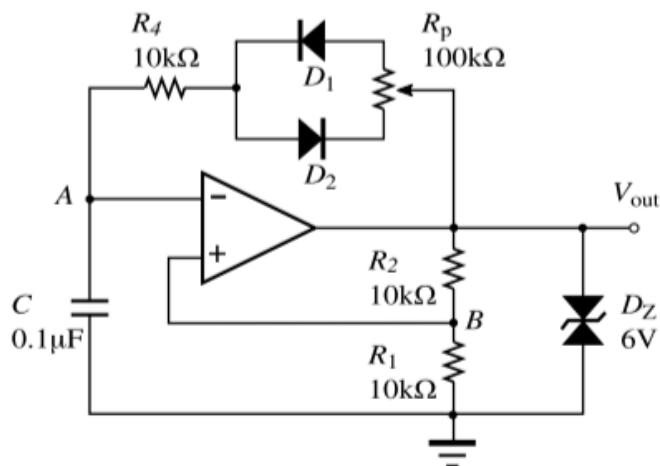


图 3.2.2 占空比可调的方波发生器

1. 测量方法

根据图 3.2.2 所示电路图连接电路。使用双踪示波器探头测量输出电压波形，也可在同时用另一探头测量电容 C 上的电压波形，从而观察输出方波和电容两端电压的关系。使用双踪示波器光标功能，测量并记录电位器滑片位于不同位置时的输出电压峰值、周期、每个周期中高电平输出所占时间、占空比。其中，占空比的计算公式如式 3-4 所示。

$$d_c = \frac{T_H}{T} \cdot 100\% \quad (3-4)$$

2. 实验数据

测量得到实验数据如表 3.2.2 所示。

表 3.2.2 占空比可调的方波发生器实验数据记录

$R_p(k\Omega)$	$V_p(V)$	measure			calculate		
		$T(ms)$	$T_H(ms)$	$d_c(\%)$	$T(ms)$	$T_H(ms)$	$d_c(\%)$
10	6.2	14.8	12.3	83.11	13.12	10.8	82.32
50	6.2	14.8	7.1	47.97	13.12	6.56	50
90	6.2	14.8	2.04	13.48	13.12	2.32	17.68

3. 数据分析

输出电压峰值为稳压管反向击穿电压，测量值 6.2V 与稳压管标称值 6V 基本符合。记图 3.2.2 中电位器滑片以上阻值为 R_{p1} ，滑片以下阻值为 R_{p2} 。占空比可调的方波发生器在一个周期内输出高电平、低电平的时间以及其震荡周期、占空比可分别根据式 3-5、式 3-6、式 3-7、式 3-8 计算。

$$T_{high} = (R_4 + R_{p1})C \cdot \ln\left(1 + 2\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (3-5)$$

$$T_{low} = (R_4 + R_{p2})C \cdot \ln\left(1 + 2\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (3-6)$$

$$T = (2R_f + R_p)C \cdot \ln\left(1 + 2\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (3-7)$$

$$d_c = \frac{R_4 + R_{p1}}{2R_f + R_p} \times 100\% \quad (3-8)$$

理论计算结果见表 3.2.2 中 calculate 栏数据。对比测量值，二者重合程度较高，证明测量结果较为准确。

3.2.3 三角波发生电路

三角波发生电路的电路图如图 3.2.3 所示，它由同相输入迟滞比较器和充放电时间常数不等的积分器构成。

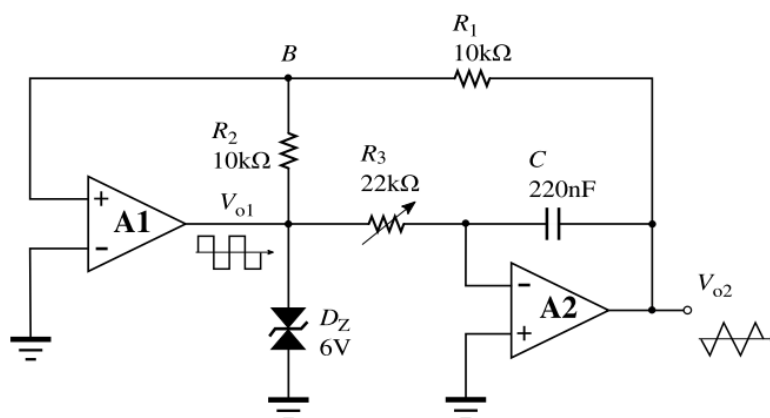


图 3.2.3 三角波发生电路

1. 测量方法

根据图 3.2.3 所示电路图连接电路。使用双踪示波器测量两级运放的输出波形，记录电路输出 V_{o1} 、 V_{o2} 的波形以及 V_{o2} 的 V_{pp} 和周期。

2. 实验数据

使用双踪示波器测量，观察发现，第一级运放输出方波，第二级运放输出三角波。其他数据记录如表 3.2.3 所示。

表 3.2.3 三角波发生器实验数据

$R_3(\text{k}\Omega)$	measure		calculate	
	$V_{pp}(\text{V})$	$T(\text{ms})$	$V_{pp}(\text{V})$	$T(\text{ms})$
5	12.56	4.96	12	4.4
10	12.56	9.84	12	8.8
15	12.56	15.60	12	13.2

3. 数据分析

根据电路基本原理进行计算，该三角波发生器振荡周期为

$$T_{total} = \frac{4R_1R_3C}{R_2} \quad (3-9)$$

根据式 3-9 进行理论计算，所得电路振荡周期的计算值如表 3.2.3 中 calculate 栏所示。对比测量值可知，二者重合程度较高，证明测量结果准确。

但测量值与理论值之间的误差依然存在。认为是实验条件下，电容和电阻的标称值和实际值之间的较大误差导致。

3.2.4 正弦波发生电路

正弦波发生电路的电路图如图 3.2.4 所示。电路主要包括选频网络和放大电路两个部分。本实验旨在对其特性，尤其是输出波形的频率特性进行探究。

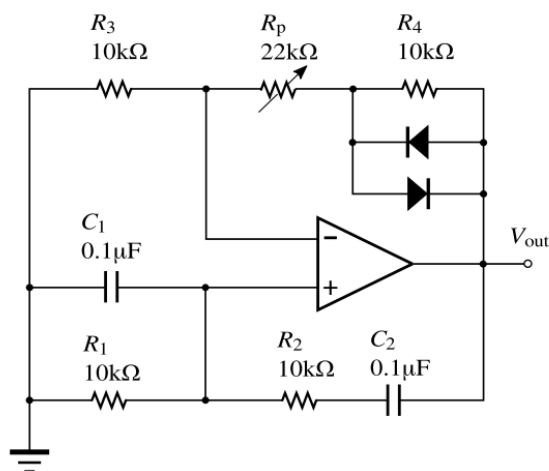


图 3.2.4 正弦波发生电路

1. 测量方法

改变电位器阻值，利用双踪示波器测量对应条件下电路输出电压波形的峰峰值、频率，利用双踪示波器 MATH 计算功能中的 FFT 计算输出波形的谐波分量，进而根据式 3-10 计算总谐波失真度。

$$THD = \sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 + \dots} \quad (3-10)$$

2. 实验数据

关于正弦波发生器实验测量所得数据的记录如表 3.2.4 所示。主要记录输出电压峰峰值分别为 3V、6V、9V、12V 时的数据。

实验中注意到，电路约在 R_p 大于 $11.79\text{k}\Omega$ 条件下起振；大于 $18.31\text{k}\Omega$ 后，输出波形失真。

表 3.2.4 正弦波发生器实验数据

$R_p(k\Omega)$	$V_{out}(V)$	$F(Hz)$	$\Delta L_2(dB)$	$\Delta L_3(dB)$	$\Delta L_4(dB)$	$\Delta L_5(dB)$	THD(%)
12.44	3	156.2	-34	-52.4	~	~	2.01
15.10	6	153.8	-26.8	-39.8	-53.6	~	4.69
16.50	9	152.5	-27.4	-37.6	-48.2	-55	4.36
17.27	12	152.5	-27.6	-36.2	-44	-50.2	4.50

3. 数据分析

根据电路基本原理进行理论分析，可知该正弦波发生电路的振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (3-11)$$

根据图 3.2.4 中的数据进行计算，理论震荡频率应为 159Hz，且震荡周期与电位器阻值无关，是恒定值。这一分析结果与实验测量所得数据基本符合，可以认为测量结果正确。且观察到，输出电压峰峰值越大，输出信号中包含的高次谐波越明显。

3.3 由运放构成的滤波器

3.3.1 压控电压源型二阶有源低通滤波电路

该类型滤波器在后文中简称为“模拟低通滤波器”。

由运放构成的模拟低通滤波器电路如图 3.3.1 所示。实验中，取 $A_0=1.58$ ， $Q=0.707$ ，测得此时的 $R_p=5.5k\Omega$ 。此外，记 $R=R_1=R_2$ ， $C=C_1=C_2$ 。

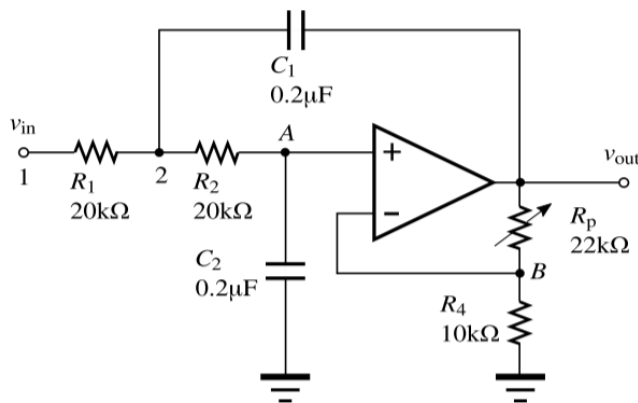


图 3.3.1 模拟低通滤波器

1. 测量方法

按图 3.3.1 所示电路图连接电路，设定信号源输出 $v_{in}=1V$ 的正弦交流电压作为模拟低通滤波器的输入。用双踪滤波器探头 CH1 测量输入电压 v_{in} ，CH2 测量输出电压。改变输入电压的频率，测量输出电压的峰峰值，并使用双踪示波器的光标功能测量输入、输出电压相位差。寻找截止频率时，不采用下降-3dB 的方法寻找，而是寻找-90° 相移点。

需要额外注意的是，本实验没有使用示波器自带的计算相位差的功能。原因是实验时注意到该功能计算出的相位差示数不断跳动，且数值极不准确。故采取更繁琐但准确的方法，使用光标功能计算相位差。

2. 实验数据

实验测量所得数据见表 3.3.1，其中，-3dB 点（截止频率）用灰色荧光标示。其幅频、相频响应曲线如图 3.3.2 所示。

表 3.3.1 模拟低通滤波器幅频特性

F(Hz)	$v_o(V)$	Gain(dB)	$\Delta\varphi (^{\circ})$
5	1.52	3.64	-10.8
10	1.54	3.75	-24.48
20	1.46	3.29	-46.08
25	1.376	2.77	-61.20
35	1.124	1.02	-88.2
36	1.1	0.83	-90
50	0.76	-2.38	-113.4
100	0.236	-12.54	-147.6
200	0.068	-23.35	-175.68

3. 数据分析

根据电路基本原理，可根据式 3-12、式 3-13、式 3-14 分别计算模拟低通滤波器的截止频率、幅频和相频响应。由式 3-12 结合图 3.3.1 中数据，计算得到电路截止频率为 39.8Hz，与实际测量得到的 36Hz 较为接近，可以认为测量正确。另外，幅频响应在达到截止频率后迅速减小，相频响应曲线单调下降的趋势也基本符合式 3-13 和式 3-14 的描述。可以认为测量基本正确。

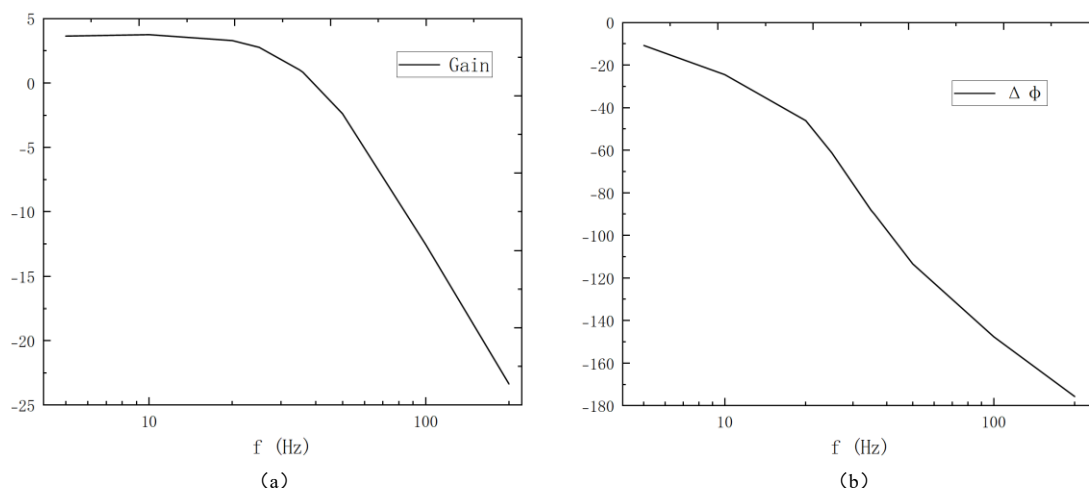


图 3.3.2 模拟低通滤波器频响曲线

(a) 模拟低通滤波器幅频曲线，(b) 模拟低通滤波器相频曲线

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-12)$$

$$20\lg \left| \frac{\dot{A}(j\omega)}{A_0} \right| = 20\lg \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_c Q}\right)^2}} \right) \quad (3-13)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \left(\frac{\omega/(\omega_c Q)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2} \right) \quad (3-14)$$

3.3.2 压控电压源型二阶高通滤波电路

该类型滤波器在下文中简称为“模拟高通滤波器”。

模拟高通滤波器电路如图 3.3.3 所示。实验中，取品质因数 $Q=1$ ， $A_0=2$ 。此时，需设定电位器阻值 $R_p=9.5k\Omega$ 。此外，记 $R=R_1=R_2$ ， $C=C_1=C_2$ 。

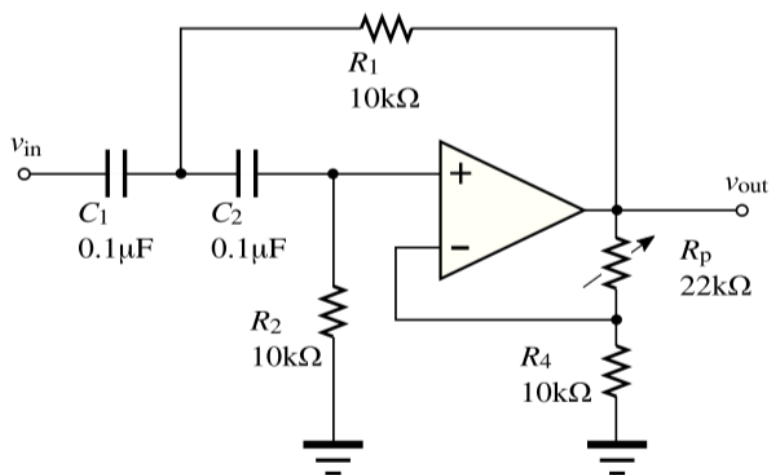


图 3.3.3 模拟高通滤波器

1. 测量方法

同 3.3.1 节所述测量方法，在此不做赘述。

2. 实验数据

实验测量模拟高通滤波器频率响应如表 3.3.2 和图 3.3.4 所示，其中，-3dB 点（截止频率）用灰色荧光标示。输入信号频率高于 100kHz 后，输出波形出现失真。

表 3.3.2 模拟高通滤波器频率响应

F(Hz)	$v_o(V)$	Gain(dB)	$\Delta\phi (^{\circ})$
10	0	~	~
20	0.04	-27.96	~
40	0.13	-17.72	-164.16
100	0.876	-1.15	-132.48
160	2	6.02	-90
200	2.26	7.08	-65.52
300	2.26	7.08	-38.88
600	2.12	6.53	-16.42
1k	2.06	6.28	-10.08
10k	2.06	6.28	0
100k	2.06	6.28	18.72

3. 数据分析

根据电路基本原理，可根据式 3-15、式 3-16 分别计算模拟高通滤波器的截止频率和幅频响应。根据式 3-15 结合图 3.3.3 中所示数据，计算得到截止频率为 160Hz，与测量得到的 159Hz 基本一致，可以认为测量正确。且注意到幅频响应曲线与式 3-16 的变化趋势基本一致，可以认为测量正确。而相频响应计算过于复杂，在此不对其计算公式做讨论。但对比所

得结果与教材^[2]所示理想高通滤波器相频特性，在变化趋势上基本一致，可以认为测量结果正确。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-15)$$

$$20 \log \left| \frac{\dot{A}(j\omega)}{A_0} \right| = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\omega_c}{\omega Q}\right)^2}} \right) \quad (3-16)$$

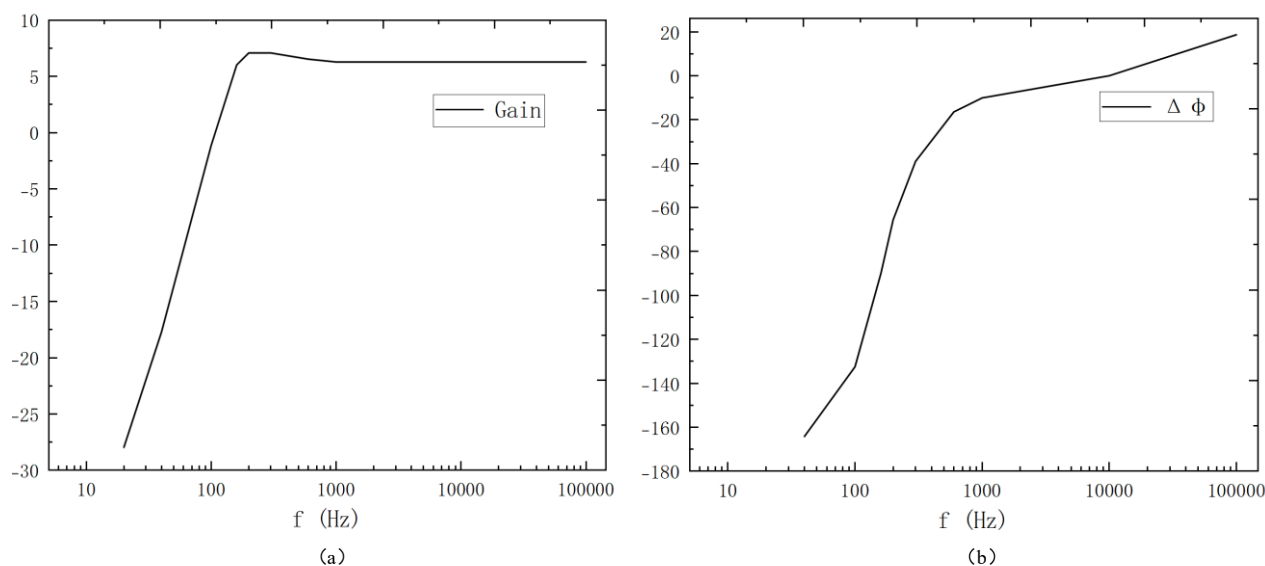


图 3.3.4 模拟高通滤波器频响曲线

(a) 模拟高通滤波器幅频曲线, (b) 模拟高通滤波器相频曲线

3.3.3 有源带通滤波电路

该类型滤波器在下文中简称为“带通滤波器”。

带通滤波器电路如图 3.3.5 所示。其中，取 $Q=0.707$ ，即使 $A_0=1$ 。此时，设定电位器阻值为 $9.38k\Omega$ 。此外，记 $R=R_1=R_2$, $C=C_1=C_2$ 。

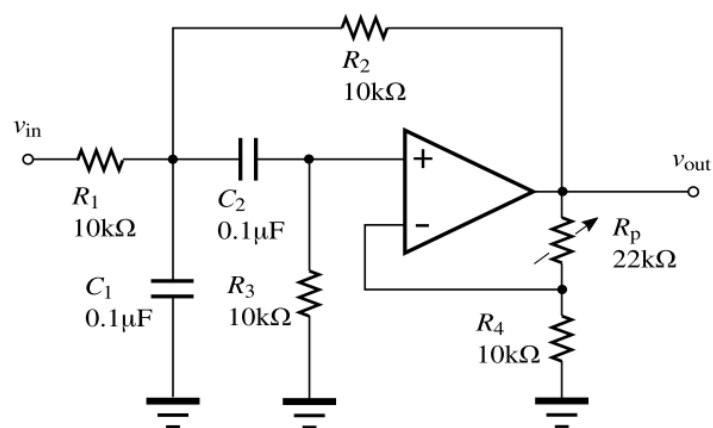


图 3.3.5 带通滤波器电路图

1. 测量方法

见 3.3.1 节测量方法。唯一不同的是，中心频率的确定方法是观察 0° 相移点所在频率位置。

2. 实验数据

实验测量带通滤波器频响所得数据见表 3.3.3，其中，-3dB 点用灰色荧光标示。测得中心频率为 230Hz，通频带宽度为 340Hz。

表 3.3.3 带通滤波器幅频响应

F(Hz)	$v_o(V)$	Gain(dB)
5	0.13	-17.72
100	0.66	-3.61
110	0.71	-2.97
200	0.95	-0.45
220	1	0
250	1	0
260	1	0
300	0.96	-0.35
390	0.80	-1.94
450	0.71	-2.97
500	0.67	-3.48
1k	0.34	-9.37
5k	0.08	-21.94
10k	0.04	-27.96

整理数据，绘制带通滤波器幅频曲线，如图 3.3.6 所示。

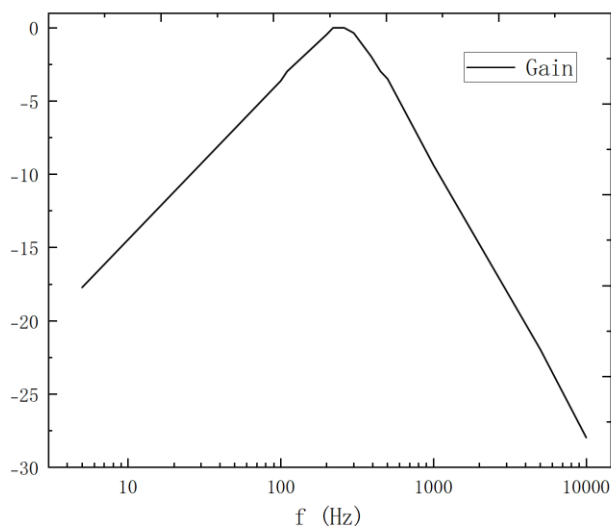


图 3.3.6 带通滤波器幅频特性曲线

3. 数据分析

根据电路基本原理，可根据式 3-17、式 3-18 和式 3-19 分别计算带通滤波器的中心角频率、通频带宽度和幅频响应。

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{RC} \quad (3-17)$$

$$BW = f_H - f_L = \frac{\omega_H}{2\pi} - \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{\omega_0}{2\pi Q} = \frac{f_0}{Q} \tag{3-18}$$

$$|A(j\omega)| = \frac{A_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}} \tag{3-19}$$

结合 $\omega = 2\pi f$ ，计算得到中心频率为 225Hz，通频带宽度 BW 为 318Hz，与实验测量所得数据基本符合。且幅频曲线与式 3-19 的变化趋势基本一致，可以认为测量结果正确。

3.3.4 有源带阻滤波电路

该类型滤波器在下文中简称为“带阻滤波器”。

带阻滤波器电路如图 3.3.7 所示。其中，取 $Q=0.5$ 。此外，记 $R = R_1 = R_2$ ， $C = C_1 = C_2$ 。

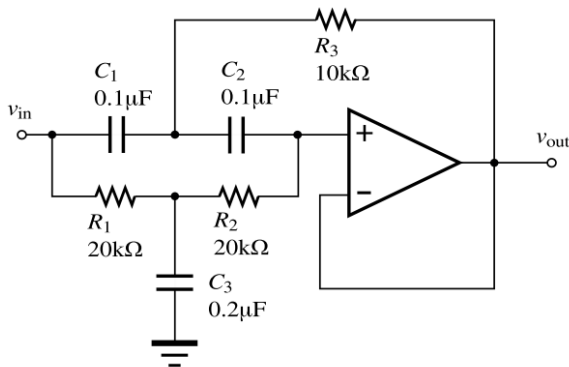


图 3.3.7 带阻滤波器电路图

1. 测量方法

见 3.3.3 节测量方法。

2. 实验数据

测量数据如表 3.3.4 所示，对应幅频曲线如图 3.3.8 所示。其中，测得陷波频率（即带阻滤波器的中心频率）约为 78Hz。

表 3.3.4 带阻滤波器幅频响应

F(Hz)	v _o (V)	Gain(dB)
5	0.992	-0.07
10	0.99	-0.09
20	0.88	-1.11
32	0.708	-3.00
50	0.43	-7.33
70	0.124	-18.13
78	0	~
100	0.25	-12.04
180	0.708	-3.00
200	0.74	-2.62
500	0.97	-0.26
1k	1	0
10k	1	0
50k	1	0
100k	1	0

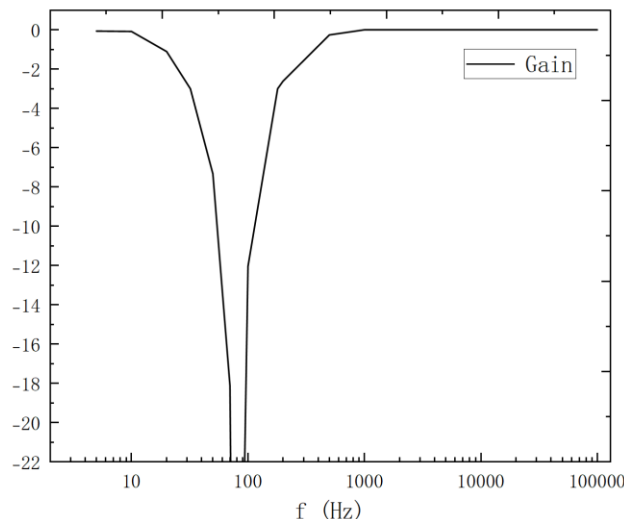


图 3.3.8 带阻滤波器幅频特性

3. 数据分析

根据基本电路原理，该带阻滤波器 $A_0 = 1$ ，可根据式 3-20 和式 3-21 分别计算其中心频率和频响特性。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-20)$$

$$\dot{A}(j\omega) = \frac{A_0 \left[1 + \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]}{1 + \frac{1}{Q} \frac{j\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (3-21)$$

根据式 3-20 和图 3.3.7 中所示数据，计算得到带阻滤波器中心频率为 79.6Hz，与实验测量得到的 78Hz 接近，且幅频曲线基本符合式 3-21 的变化趋势，可以认为测量正确。

四、误差分析

4.1 交流小信号的测量误差

实验测量所用双踪示波器在测量幅值较小的交流小信号时，波形散布严重，难以从示波器显示波形中找出准确的交流信号峰峰值。实验中，为避免这一误差，尽量在保证不失真的前提下，设置较大的输入信号，确保待测信号够大，能够准确测量。

4.2 示波器 FFT 图像不稳

实验中注意到，使用双踪示波器 MATH-FFT 功能时，其计算结果会显示为折线图，但该图像并不稳定，很难准确测量。谐波失真部分的测量结果可能出现较为严重的误差。实验测量中，取抖动的中间值，以求尽量避免此误差。

4.3 实验条件限制

实验箱中元器件标称值与实际值有较大误差。其中，电容的数值偏差尤其严重，约在 10%

左右，导致计算和实际测量结果之间存在较大偏差。

五、总结

本次实验围绕运放构成的基本运算电路、振荡器和滤波器展开，通过理论分析结合实际测量，验证了各类电路的功能特性与设计原理。实验分为三个主要部分，每个部分均进行了详细的参数测量和数据分析，并与理论计算结果进行了对比验证。

在基本运算电路部分，反相放大器、同相放大器、微分器和积分器的频响特性及输入输出电阻均与理论预期基本一致。例如，反相放大器的输入电阻实测为 $1.01\text{k}\Omega$ （理论 $1\text{k}\Omega$ ），输出电阻实测 4.52Ω （理论 0Ω ），误差主要源于实际运放的“非理想性”。微分器和积分器的高频特性偏差则与运放自身带宽限制相关，体现了实际电路与理想模型的差异。

振荡器电路部分，方波、三角波和正弦波发生器的设计验证了正反馈与选频网络的关键作用。实测振荡频率与理论值的误差（如方波发生器周期误差约 5%）主要归因于元件标称值与实际值的偏差（如电容误差）。此外，正弦波发生器的谐波失真随输出幅值增大而显著，反映了非线性稳幅机制的局限性。

滤波器电路部分，低通、高通、带通和带阻滤波器的幅频与相频特性均符合理论公式。例如，低通滤波器的截止频率实测 36Hz （理论 39.8Hz ），误差源于 RC 网络参数的实际偏差。带通滤波器的中心频率实测 230Hz （理论 225Hz ），通带宽度实测 340Hz （理论 318Hz ），进一步验证了 Q 值对滤波性能的影响。

误差分析表明，实验误差主要来源于三方面：一是实验箱元件的标称值与实际值偏差（如电容误差约 10%）；二是示波器测量小信号时的精度限制；三是高频下运放带宽不足导致的特性偏离。此外，FFT 功能的不稳定性也为谐波分析引入了不确定性。

通过本次实验，深入理解了运放在信号运算、波形生成和频率选择中的核心作用，掌握了电路搭建、参数测量和误差分析的基本方法。实验数据与理论的高度吻合证明了电路设计的合理性，同时也揭示了实际工程中需综合考虑元件精度、非线性效应和测量工具限制的重要性。

致谢

真诚感谢指导教师方元老师对实验过程中笔者种种问题的耐心解答。

首先，授课教师考虑到撰写实验报告的负担较重，因此减少实验报告的提交次数，笔者在此对各位授课教师为学生做出的考量致以诚挚的感谢。然而，借此机会，笔者希望浅谈这一考核方式的看法。虽减少了实验报告的提交次数，但所提交的实验报告仍然需要包含所有实验内容，实际工作量并没有得到很大的减少，甚至在一定程度上反而加重了内容安排和排版上的负担。或许，是采取这种方式，或是每次实验的实验报告单独撰写和提交，仍然是一个值得商榷的问题。

附件

纸质实验记录图片，已上传至 github，可供查阅。

<https://github.com/yz-Gao/Report-of-Analog-Circuit-Experiment>

参考文献

- [1] 高荧泽, 实验一 双极结型晶体管(BJT) 实验报告.
<https://github.com/yz-Gao/Report-of-Analog-Circuit-Experiment>
- [2] 康华光等, 电子技术基础 模拟部分(第七版), 高等教育出版社.