

| Preview Report |  | Experimental Record |  | Analysis & Discussion |  | Total |  |
|----------------|--|---------------------|--|-----------------------|--|-------|--|
|                |  |                     |  |                       |  |       |  |

|                  |               |                      |                     |
|------------------|---------------|----------------------|---------------------|
| Grade & Major:   | 2022, Physics | Group number:        | A2                  |
| Student name:    | 杨舒云 & 戴鹏辉     | Student number:      | 22344020 & 22344016 |
| Experiment time: | 2024/10/9     | Teacher's Signature: |                     |

## ET2- 测量放大器

### Measuring amplifier

#### 【Precautions】

1. The lab report consists of three parts:

- (1) **Prview Report:** Carefully study the experimental manual before class to understand the experimental principles; familiarize yourself with the instruments, equipment, and tools needed for the experiment, and their usage; complete the pre-lab thought questions; understand the physical quantities to be measured during the experiment, and prepare the experimental record forms in advance as required (you may refer to the experiment report template and print it if needed).
- (2) **Experimental Records:** Meticulously and objectively record the experimental conditions, phenomena observed during the experiment, and data collected. Experimental records should be written in ballpoint pen or fountain pen and signed (**Records written in pencil are considered invalid**). **Keep original records, including any errors and deletions; if a correction is necessary due to an error, it must be made according to the standard procedure.** (Records should not be entered into a computer and printed, but handwritten notes can be scanned and printed); before leaving, have the experimental teacher check and sign the records.
- (3) **Data Processing and Analysis:** Process the raw experimental data (except for experiments that focus on learning the use of instruments), analyze the reliability and reasonableness of the data; present the data and results in a standardized manner (charts and tables), including numbering and referencing the data, charts, and tables sequentially; analyze the physical phenomena (including answering the experimental thought questions, writing out the thought process, and citing data as needed according to standards); finally, draw a conclusion.

The experiment report combines the preparation report, experimental records, and data processing and analysis, along with this cover page.

2. Submit the **experiment report** within one week after completing each experiment (under special circumstances, no later than two weeks).

**【Special Note】**

Special thanks to Huanyu Shi, a senior from the Class of 2019, for providing the L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X template for this experiment report. Due to the absence of an experiment number in the original template, a self-named number has been added for ease of organization on the computer. Additionally, **this experiment report** is being improved towards full English expression, so there may be instances of mixed Chinese and English during this transition period. We appreciate your understanding!

# TABLE OF CONTENTS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 测量放大器</b>                                    |           |
| <b>Preview Report</b>                             | <b>4</b>  |
| 1.1 Purpose . . . . .                             | 4         |
| 1.2 Instruments & Equipment . . . . .             | 4         |
| 1.3 Principle . . . . .                           | 5         |
| 1.4 Thinking Before Experiment . . . . .          | 6         |
| <b>2 测量放大器</b>                                    |           |
| <b>Experimental Record</b>                        | <b>8</b>  |
| 2.1 Content, Procedures & Results . . . . .       | 8         |
| 2.2 Difficulties . . . . .                        | 8         |
| <b>3 测量放大器</b>                                    |           |
| <b>Analysis &amp; Discussion</b>                  | <b>10</b> |
| 3.1 Data Processing . . . . .                     | 10        |
| 3.1.1 Analysis . . . . .                          | 10        |
| 3.1.2 Conclusion . . . . .                        | 11        |
| <b>4 差分放大器</b>                                    |           |
| <b>The End</b>                                    | <b>12</b> |
| 4.1 Summary, Thoughts & Acknowledgments . . . . . | 12        |
| 4.2 Attachment . . . . .                          | 12        |

# 测量放大器

## Preview Report

### 1.1 Purpose

1. 深入了解差分电路的原理，以及其关键参数：共模抑制比（CMRR）、输入电阻、输入及输出电压范围（非失真放大的范围）、放大倍数以及频率响应。
2. 掌握差分探测在实际测量中的应用。
3. 熟悉模拟电路仿真套件的使用。

### 1.2 Instruments & Equipment

| Number | Name           | Quantity | Main parameters(model, measurement range, measurement accuracy, etc.) |
|--------|----------------|----------|---|
| 1      | 函数信号发生器        | 1        | DG4152  |
| 2      | 示波器            | 1        | DS1104  |
| 3      | 直流稳压电源         | 1        | DP832   |
| 4      | 导线             | 若干       |   |
| 5      | $Model_A$ 电路模块 | 若干       | 同相放大器、反相放大器   |
| 6      | $Model_D$ 电路模块 | 若干       | 差分放大、仪表放大   |
| 7      | $Model_E$ 电路模块 | 若干       | INA114 仪表放大器  |
| 8      | 主板电路模块         |          |   |

### 1.3 Principle

#### ▶ 差模信号与共模信号：

差模信号是指在两个导线之间传输的信号，其在两个导线上的电压是相反的。也就是说，如果一个导线上的电压是  $V$ ，那么另一个导线上的电压就是  $-V$ 。

共模信号是指在两个导线之间传输的信号，其在两个导线上的电压是相同的。也就是说，如果一个导线上的电压是  $V$ ，那么另一个导线上的电压也是  $V$ 。

差模信号有很强的靠干扰能力。由于差模信号在两个导线上的电压是相反的，因此当外部噪声同时作用在两个导线上时，这些噪声会被抵消掉，从而提高了信号的抗干扰能力。

在实际的信号传输中，信号往往是由差模信号和共模信号的叠加组成的。为了提高信号的传输质量和抗干扰能力，通常需要采取一些措施来抑制共模信号的影响，比如使用差分放大器，即我们本实验的出发点之一。

#### ▶ 共模抑制比：

共模抑制比是衡量差分放大器性能的一个重要指标，它表示放大器对差模信号的增益与对共模信号的增益之比，其定义为放大器对差模信号的电压放大倍数  $A_{ud}$  与对共模信号的电压放大倍数  $A_{uc}$  之比。

$$CMRR = \frac{A_{ud}}{A_{uc}}$$

其通常也以分贝（dB）为单位表示：

$$CMRR(\text{dB}) = 20 \log \frac{A_{ud}}{A_{cd}}$$

共模抑制比衡量了放大器在放大差模信号的同时，对共模信号的抑制能力。高 CMRR 意味着放大器能够更好地抑制共模干扰，从而保持信号的完整性，确保信号在传输过程中能够准确地保持其原始特征。

#### ▶ 基本设计思路：

##### 1. 先放大后差分：

考虑先将两路信号分别进行同等倍数的放大，然后进行差分处理。

现有的 Model——E 模块可以实现仪表放大器的功能，即“先放大后差分”。

##### 2. 先差分后放大：

考虑先将两路信号进行差分，然后进行放大处理。

考虑将现有的 Model——D 和 Model——A 串联使用。

###### ● Model——D 使用方法：

跳线 JP1 连接 2, 3，跳线 JP2 连接 2, 3，并使用 3 个 OP07 芯片，即可实现差分放大器的功能，其增益固定为 10 倍。

###### ● Model——A 使用方法：

做同相放大器时：跳线 JP1 连接 1, 2，跳线 JP2 断开，跳线 JP3 闭合，跳线 JP4 闭合以保证增益可调。

做反相放大器时：跳线 JP1 连接 2, 3, 跳线 JP2 断开, 跳线 JP3 断开, 跳线 JP4 闭合以保证增益可调。

#### ► -3dB 频率的含义

在声学和电子学中, -3dB 频率 (也称为截止频率) 是一个特定的频率点, 用来描述一个滤波器或系统对信号的增益或衰减。dB 是分贝 (decibel) 的缩写, 是一个对数单位, 用来表示两个物理量 (如功率、强度或电压) 的比值。

具体来说, -3dB 频率是指在滤波器或系统的频率响应曲线上, 增益或衰减达到-3 分贝的频率点。由于分贝是一个对数单位, -3dB 表示功率比 (或信号强度比) 下降到了原始值的一半。在理想情况下, 对于一个低通滤波器, -3dB 频率是滤波器开始显著衰减信号的点; 对于一个高通滤波器, -3dB 频率是滤波器开始显著放大信号的点。

在实际应用中, -3dB 频率通常用来定义滤波器的带宽范围, 即滤波器能够有效处理信号的频率范围。例如, 一个低通滤波器的-3dB 频率是 1000Hz, 这意味着在 1000Hz 以下的频率, 滤波器的增益接近于 0dB (即无衰减), 而在 1000Hz 以上的频率, 滤波器的增益开始下降, 信号强度减半。

## 1.4 Thinking Before Experiment

### Reflection Question 1.1:

在很多精密的测量中为什么要用电桥的思想, 它在信号的提前方面有什么优势?

电桥通过电磁平衡原理来实现测量, 当电桥达到平衡状态时, 输出电压为零, 这种平衡状态可以提供极高的测量精度。任何微小的电阻变化都会打破平衡, 从而被检测到, 这使得电桥能够非常灵敏地测量微小的信号变化。

电桥可以有效地处理差分信号, 抑制共模干扰。在精密测量中, 差分信号处理可以提高信号的抗干扰能力, 确保测量结果的准确性。

电桥的对称性是其高精度和高 CMRR 的关键。对称的电路设计可以确保两个输入端的信号在传输过程中受到相同的处理, 从而有效抑制共模信号。任何微小的不对称都会导致共模信号的残留, 影响测量精度。因此, 高对称性的电桥设计是实现高精度测量的重要保障。

### Reflection Question 1.2:

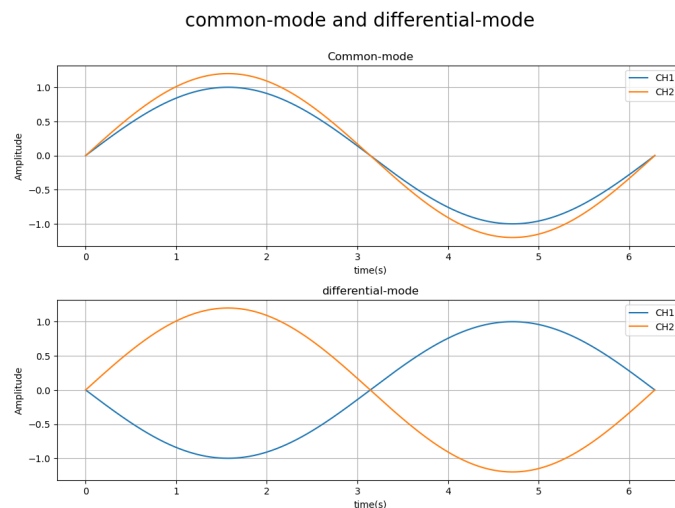
如何用函数发生器输出具有类似电桥功能的电压信号, 简要画出波形的示意图。

可以在函数发生器的两路输出设置相同的信号, 若是二者同相位, 这即是共模信号, 若是反相位, 即是差模信号。如Figure 1所示。

### Reflection Question 1.3:

分析如何实现高的共模抑制比。

电路的对称性是实现高 CMRR 的关键因素之一。对称的电路设计可以确保两个输入端的信号在传输过程中受到相同的处理, 从而有效抑制共模信号。例如, 在差分放大器中, 输入级的晶体管或运算放大器的输



**Figure 1:** 共模信号与差模信号示意图

入端应该尽可能对称，以减少由于不对称引起的共模增益。

电路中使用的元件（如电阻、电容）应尽可能匹配。元件的不匹配会导致电路不对称，从而降低 CMRR。例如，在差分放大器中，输入电阻和反馈电阻的匹配度越高，CMRR 越高。

在信号进入放大器之前，可以使用滤波器来滤除高频噪声，减少共模干扰。此外，信号调理电路也可以帮助提高信号的质量和稳定性。

|                      |               |                        |                     |
|----------------------|---------------|------------------------|---------------------|
| Major:               | Physics       | Grade:                 | 2022                |
| Name:                | 杨舒云 & 戴鹏辉     | Student number:        | 22344020 & 22344016 |
| Room temperature:    | 26°C          | Experimental location: | A522                |
| Student's Signature: | In Attachment | Score:                 |                     |
| Experiment time:     | 2024/10/16    | Teacher's Signature:   |                     |

测量放大器

Experimental Record

2.1    Content, Procedures & Results

实验中我们使用“先差分后放大”的思路，将 Model-D 和 Mo-A 串联使用，来搭建差分放大器。

1. 测量差模放大倍数与共模放大倍数：

首先设置信号发生器为两路相同的正弦波，频率  $f = 1\text{kHz}$ ，峰峰值  $V_{pp} = 25.0\text{mV}$ ，然后将两路信号相位差设置为  $180^\circ$ ，使用示波器测量输出信号的峰峰值为  $V_{out} = 5.12\text{V}$ 。

按照上面相同的参数设置信号发生器输出信号，并将两路信号设置至同相位，测量输出信号峰峰值为  $V_{out} = 30.04\text{mV}$ 。

由于两路信号是由不同的 channel 输出的，可能存在不相等的噪声。于是，我们将一路信号用三通管分成两路信号，接入测量放大器中，并将输入信号的峰峰值增加至  $V_{in} = 10\text{V}$ ，测量到的输出信号峰峰值为  $V_{out} = 6.80\text{mV}$

2. 放大倍数的极限值测量：

为了实现 1-100 倍的放大倍数，需要注意将 Model-A 设置为反相放大器。

按照上面相同的参数设置信号发生器输出信号,测量差模放大倍数,得到最小输出信号峰峰值为: $V_{min} = 2.40\text{mV}$ 。

最大不失真的输出信号峰峰值为：  $V_{max} = 20.2\text{V}$

3. 通频带测量：

我们在不同的频率下，测量差分放大器的输出信号大小，以此测量放大器的通频带。

测量数据如Table 1所示。

2.2    Difficulties

1. 若是要保证放大倍数最低能到 1，一定要将 Model-A 设置为反相放大器。



|       |       |       |        |        |        |        |        |         |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 频率/Hz | 1     | 2     | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8       |
| 输出/V  | 5.440 | 5.400 | 5.400  | 5.400  | 5.440  | 5.440  | 5.400  | 5.400   |
| 频率/Hz | 9     | 10    | 50     | 100    | 500    | 1000   | 2000   | 3000    |
| 输出/V  | 5.400 | 5.400 | 5.400  | 5.480  | 5.520  | 5.480  | 5.440  | 5.360   |
| 频率/Hz | 4000  | 5000  | 6000   | 7000   | 8000   | 9000   | 10000  | 20000   |
| 输出/V  | 5.280 | 5.120 | 5.000  | 4.840  | 4.680  | 4.520  | 4.360  | 3.000   |
| 频率/Hz | 50000 | 70000 | 100000 | 200000 | 300000 | 500000 | 800000 | 1000000 |
| 输出/V  | 1.380 | 1.010 | 0.700  | 0.360  | 0.248  | 0.152  | 0.100  | 0.078   |

Table 1: 不同频率对应差分放大器的输出

- 反相放大器的放大倍数公式为

$$A_v = -\frac{R_f}{R_i}$$

其视具体的反馈电阻而定，最小可以取到 0。

- 而对于同相放大器，其放大倍数公式为：

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

其最小也只能取到 1。

而我们的放大器由 Model-D 和 Model-A 串联构成，Model-D 的放大倍数为固定增益的 10 倍。

所以。只有反相放大器才能够在我们的差分放大器中，实现 1-100 的放大倍数。

2. 在测量通频带时，当改变信号发生器参数后，一定要点击同相位，否则两个信号之间会有随机的相位差，就不是我们所希望测量的差模信号或共模信号了。

|        |            |                 |                     |
|--------|------------|-----------------|---------------------|
| Major: | Physics    | Grade:          | 2022                |
| Name:  | 杨舒云 & 戴鹏辉  | Student number: | 22344020 & 22344016 |
| Date:  | 2024/12/31 | Score:          |                     |

## 测量放大器

### Analysis & Discussion

#### 3.1 Data Processing

##### 3.1.1 Analysis

##### 1. 测量差模放大倍数与共模放大倍数：

由测量数据可知：

$$\text{差模放大倍数: } A_{d1} = \frac{5.12\text{V}}{50\text{mV}} = 102.4$$

$$\text{共模放大倍数: } A_{c1} = \frac{30.04\text{mV}}{25\text{mV}} = 1.2016$$

$$A_{c2} = \frac{6.80\text{mV}}{10\text{V}} = 6.8 \times 10^{-4}$$

则共模抑制比为：

$$CMRR_1 = \frac{102.4}{1.2016} = 85.22 = 38.61\text{dB}$$

$$CMRR_2 = \frac{102.4}{6.8 \times 10^{-4}} = 1.5 \times 10^5 = 103.56\text{dB}$$

则该测量放大器的极限共模抑制比为 103.56 dB。由于通过示波器测量输出信号，这可能已经达到了示波器的输出值的下限，所以测量人有一定的误差。

##### 2. 放大倍数的极限值测量：

由测量数据可以计算得到放大倍数：

$$\text{最大放大倍数: } A_{dmax} = \frac{20.2\text{V}}{50\text{mV}} = 404$$

$$\text{最小放大倍数: } A_{dmin} = \frac{2.40\text{mV}}{50\text{mV}} = 0.048$$

即放大倍数可以通过设置不同的反馈电阻的值，取到 0.048 - 404 倍。

##### 3. 通频带测量：

将测量到的不同频率下的放大倍数进行绘图，得到结果如Figure 2。

可以看到，在 5000Hz 频率开始，放大倍数有明显的下降。在输出值下降至最大值的 0.707 倍时，定义为截止频率，大约为 15kHz。

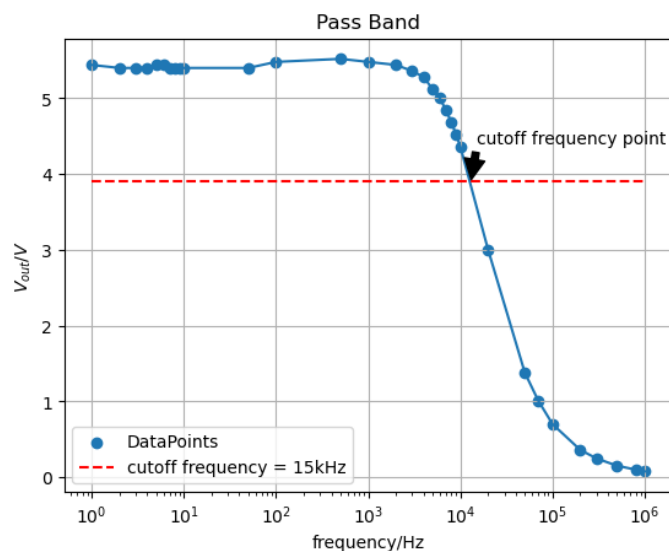


Figure 2: 差分放大器的通频带

所以其通频带约为 0 - 15 kHz。

### 3.1.2 Conclusion

- ▶ 我们通过“先差分后放大”的思路，使用 Model-D 与 Model-A 串联使用，搭建了一个差分放大器，实现了最高 103.56dB 的共模抑制比。
- ▶ 同时，通过调节不同的反馈电阻的值，可以调整该放大器的放大倍数在 0.048 - 404 倍之间变化。
- ▶ 该差分放大器的通频带，经过测量，为 0 - 15kHz。