

# CALK-1000电路分析实验套件 实验指导书

Rev 1.0

华清科仪（北京）科技有限公司  
 **Huatsing Instruments**

## 目 录

CALK-1000 电路分析实验套件介绍.....	- 1 -
HPI-1000 口袋仪器安装与使用注意.....	- 3 -
实验 1 熟悉 CALK-1000 套件的使用.....	- 6 -
实验 2 基尔霍夫第一定律 (KCL) 实验.....	- 8 -
实验 3 基尔霍夫第二定律 (KVL) 实验.....	- 10 -
实验 4 叠加定理实验.....	- 12 -
实验 5 戴维南定理实验.....	- 14 -
实验 6 受控源实验.....	- 16 -
实验 7 一阶 RC 电路响应实验.....	- 19 -
实验 8 RLC 串联谐振实验.....	- 23 -
附录 A 部分思考题参考答案.....	- 28 -

## CALK-1000 电路分析实验套件介绍

感谢使用华清科仪推出的 CALK-1000 电路分析实验套件，该套件可与 HPI-1000 口袋仪器无缝连接配合使用，能够完成众多电路原理、电路分析实验项目。



CALK-1000 电路分析实验套件

### 套件内各种器件与工具介绍

#### 1. 配套工具

CALK-1000 套件中配备的实验工具：

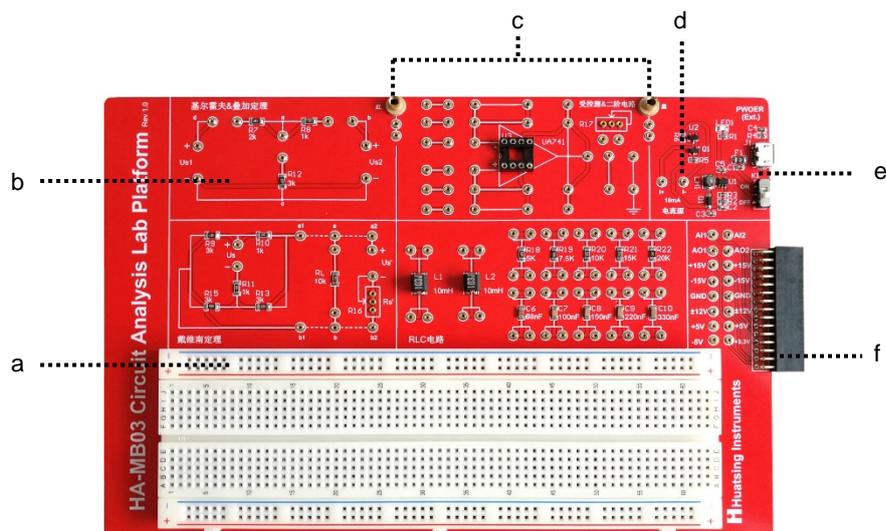


配套工具

- 万用表：UT120C 型 3 3/4 位数字万用表，可以测量交/直流电压、交/直流电流、电阻、电容、频率、占空比、二极管通断，使用前请仔细阅读万用表使用手册。
- 螺丝刀：一字/十字可换，顶端带磁铁，从面包板上拔除芯片时请使用一字端。
- 剥线钳：用于切断短接线，并剥除线皮。
- micro-USB 供电线（白色）：用于 HA-MB03 实验面包板供电，该线只能用于供电，不具数据通信功能。

#### 2. HA-MB03 面包板

塑料盒下层为实验用的 HA-MB03 实验面包板



HA-MB03 实验面包板

HA-MB03 实验面包板部件描述

序号	名称	描述
a	用户实验区	可以使用套件中专用短接线连接到半定制实验区的散孔座，自行搭建电路，扩展实验内容
b	半定制实验区	可以完成基尔霍夫定律、叠加定理、戴维南定理、受控源电路、二阶电路、RLC 谐振电路等实验内容
c	万用表表笔座	为了实验方便，配置了 2 个带弹簧锁片的万用表表笔座，可以将套件中 UT120C 万用表表笔牢固的插入座中
d	电流源	短路电流 10mA
e	USB 电源	为电流源供电，请用 micro-USB 线连接+5V DC 电源（不可连接其他电源）
f	HPI 专用接口	用于连接 HPI-1000 口袋仪器， <b>注意方向，插拔时切勿把 HPI-1000 口袋仪器接口内的插针碰弯折断</b>

## HPI-1000 口袋仪器安装与使用注意

HPI-1000 口袋仪器如果已经正确安装并且已掌握使用技巧可以跳过此节，直接阅读后续具体实验章节，否则务必认真阅读这一部分。

### HPI-1000 口袋仪器软件安装

#### 1. 上位机程序下载

首先，请从华清科仪网站 [http://www.huatsing.com/download/d\\_pis/](http://www.huatsing.com/download/d_pis/) 下载上位机程序。



上位机程序下载

#### 2. 上位机程序安装

安装上位机程序不必连接硬件，直接运行 Pocketlab\_Setup.msi 安装程序即可，默认安装路径是在 C 盘根目录下建立一个 PocketLab 文件夹，如果不合适可以自行更改安装路径。

如果安装过程出现如下提示，说明电脑上装有之前版本的上位机程序，可以先删除旧版本程序，再进行安装。



#### 3. 硬件连接

请用 HPI-1000 口袋仪器套件中的 micro-USB 线（黑色）连接口袋仪器后端中间的 USB 口与电脑（边上的辅助供电口可不连接）。正确连接后，口袋仪器顶面的指示灯应呈现绿色常亮状态，**如果呈现不亮或出现黄色、红色或闪烁状态，请立即断开 USB 连线并检查设备与连接是否正确。**



HPI-1000 口袋仪器后端接口



顶面指示灯

#### 4. 硬件驱动安装

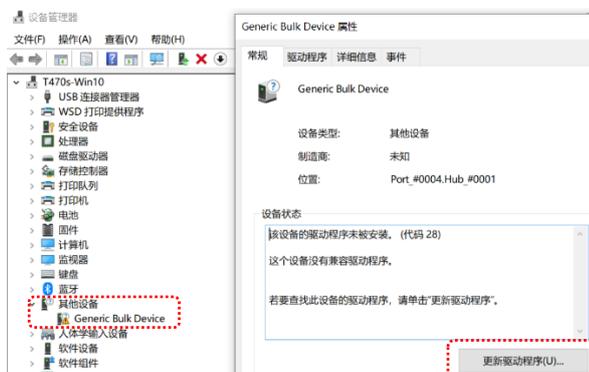
硬件连接后电脑右下角会显示 **Generic Bulk Device** 设备已安装就绪的提示。



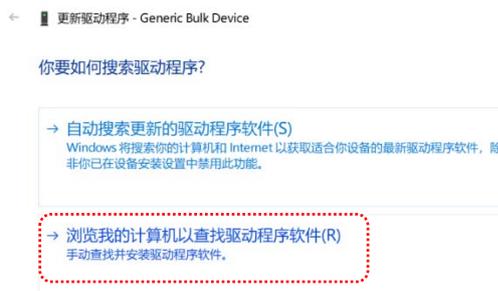
但这不意味的硬件驱动已经正确安装，这时点击桌面上的“口袋实验室”运行图标会看到如下提示，这说明硬件驱动还未正确安装。



打开电脑设备管理器，可以看到电脑并没有正确识别 **HPI-1000** 口袋仪器，因此在 **Generic Bulk Device** 设备图标上有一个黄色惊叹号。请双击设备图标，选择更新驱动程序。



接下来指定一下驱动程序的位置（选择手动查找而非自动搜索）。



硬件驱动位于上位机程序文件夹的 **windows driver** 子目录中，如果选择默认安装路径，那就是 **C:\PocketLab\windows driver**，注意把“包括子文件夹”选项勾选上。



然后电脑将安装驱动，驱动安装好后将显示正确的设备名称 TivaWare Bulk Devices，并且图标上的黄色惊叹号也将消失。至此驱动安装完成。



## HPI-1000 口袋仪器使用注意

口袋仪器包含众多模块，结构复杂，又仅依靠 USB 口供电，驱动能力有限，因此使用时务必注意以下电气特性，因为使用不当造成的设备损坏不在保修范围之内。

### 1. 绝对禁止事项

- 信号源（AO1 与 AO2）绝对禁止对地短路，哪怕瞬间也有可能造成设备损坏；
- 信号源（AO1 与 AO2）负载阻抗不得低于 1KΩ；
- 各路固定电源与程控电源禁止对地短路；

### 2. 口袋仪器各个模块承载参数（超出以下参数有可能造成设备损坏）

模块	特性	参数
示波器	输入信号范围	-15 ~ +15V
信号源 1（大信号）	输出电流	10mA
信号源 2（小信号）	输出电流	5mA
逻辑分析仪	输入信号范围	0 ~ 4V
固定电源 (不使用辅助电源)	+5V 驱动能力	100mA
	-5V 驱动能力	20mA
	+15V 驱动能力	50mA
	-15V 驱动能力	50mA
	+3.3V 驱动能力	200mA
程控电源	-12 ~ +12V 驱动能力	20mA

## 实验 1 熟悉 CALK-1000 套件的使用

### 实验目的

熟悉 CALK-1000 电路分析实验套件的使用，避免人为损坏。

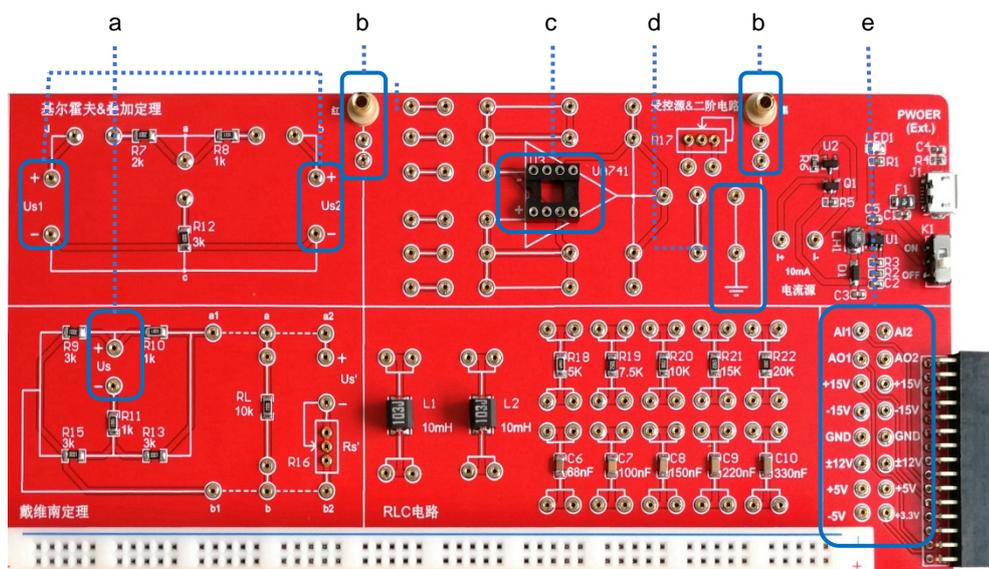
### 实验器材

1. CALK-1000 电路分析实验套件
2. HPI-1000 口袋仪器
3. 短接线、剥线钳、USB 供电线、+5V DC 电源等

### HA-MB03 面包板的使用

CALK-1000 套件中最主要的组成部分就是 HA-MB03 面包板，虽然之前已经简要介绍过面包板上各个部件名称与作用，但是熟悉其中一些模块特性与电路连接细节可以提高后续实验的成功率，更重要的是避免人为误操作造成的设备损坏。

#### 1. 熟悉 HA-MB03 面包板的电气连接



HA-MB03 实验板电气连接

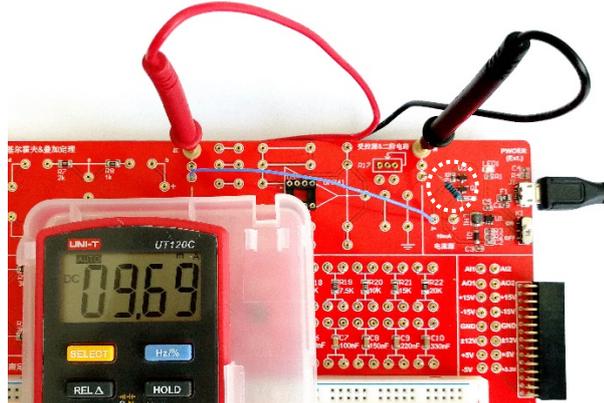
序号	描述
a	实验区电源两极都是浮空的，用户根据需要自行用短接线连接 e 区的电压源或板子上的电流源， <b>注意负极的正确连接</b> ；
b	万用表表笔座（以及下面的散孔座）也浮空的，可以通过短接线根据需要串入（测量电流）或并入电路（测量电压）， <b>注意万用表功能档的选择，不用的时候关闭或调到电压档</b> 。
c	IC 芯片座只能插入 TI UA741 运放芯片（ <b>注意方向</b> ），芯片的 7 脚（VCC+）、4 脚（VCC-）已经连接到 e 区的+15V、-15V 电源。
d	GND 端，电路板上唯一与 e 区地端（GND）有电气连接的散孔座
e	HPI-1000 口袋仪器信号及电源区，其中 GND 连接的是口袋仪器模拟地 AGND

## 2. 熟悉 HA-MB03 实验板上的电流源

将 HA-MB03 电路板接入+5V 电源（不必连接 HPI-1000 口袋仪器），打开电源开关，这时红色电源指示灯 LED1 应该点亮，如果没有亮或是闪烁，请立即关闭电源检查电气连接是否正确。

电源连接正确后，请用配套的 UT120C 万用表的毫安（mA）电流档测量电流源空载时（I+与 I-直接连接万用表红黑表笔）的短路输出电流。

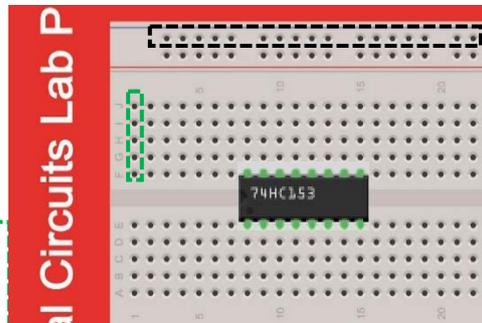
测试完空载时电流源的输出电流还可以参考下图测试一下带载时电流源的输出：在 I+与 I-直接传入一个电阻（不要大于 1K $\Omega$ ）后再再测量输出电流值。



电流源带载输出测量（圆圈中为负载电阻）

## 3. 熟悉 HA-MB03 电路板的用户实验区

简单的电路可以在半定制实验区搭接，复杂一些的扩展电路、自定义电路就要借助用户扩展实验区（面包板区域）了。面包板区域由 2 个中心块和 3 个边条组成，其中红色、蓝色线条内的边条区域每一行的孔是连通的，（图片中黑色虚线框内的孔都是连通的）；中心块的每一列的 5 个孔是连通的（图片中绿色虚线框内的 5 个孔都是连通的）；芯片应该像图片中那样插接在中心块沟槽的两侧。



需要特别注意的是：1.芯片在插拔过程中要特别小心不要把管脚弄弯折断，在拔除芯片时可以借助实验套件中配备的一字螺丝刀；2.在面包板和端子上连接导线时也要特别小心不要把线头折断在孔洞内，尤其禁止把面包板或端子上连接的多根导线一下子用力同时拔掉，这样极易造成线头折断在孔内或是孔内簧片损坏。

## 实验 2 基尔霍夫第一定律 (KCL) 实验

### 实验目的

通过实验理解掌握基尔霍夫第一定律 (KCL)

### 实验器材

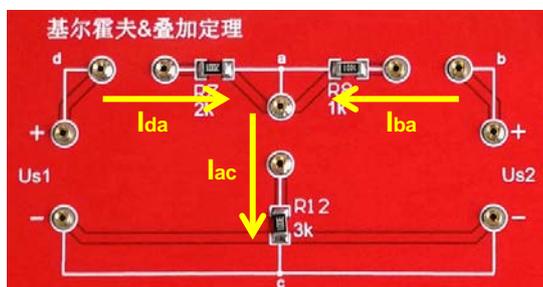
1. HA-MB03 实验板
2. 工具与配件:
  - a) UT120C 万用表
  - b) HPI-1000 口袋仪器
  - c) 短接线、剥线钳、镊子.....

### 实验要求

在 HA-MB03 实验板上基尔霍夫&叠加定理半定制实验区完成基尔霍夫第一定律验证。

### 实验分析

基尔霍夫定律分为第一定律与第二定律，其中第一定律又称结点电流定律 (KCL)，第二定律又称回路电压定律 (KVL)。这个实验研究第一定律，即**结点电流定律 (KCL)**：对电路中任一节点而言，在任一时刻，流入结点的电流的代数和恒等于零。该定律用来描述电路中各支路电流间的约束关系。



在 HA-MB03 实验板上基尔霍夫&叠加定理半定制实验区完成结点电流定律验证。首先规定一下电流方向的表示： $I_{da}$  表示电流由 d 点流向 a 点，同理： $I_{ba}$  表示电流由 b 点流向 a 点， $I_{ac}$  表示电流由 a 点流向 c 点。当我们给电路加入  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$  两个电压源时，测量一下流入结点 a 的电流的代数和是否为零。

### 实验流程

1. 把 HPI-1000 口袋仪器连接到 HA-MB03 实验板，口袋仪器先不连接电脑；
2. 左边的  $U_{s1}$  电压源 +/- 极分别连接口袋仪器的 +15V 端与 GND 端；
3. 右边的  $U_{s2}$  电压源 +/- 极分别连接口袋仪器的 +5V 端与 GND 端；
4. 把 UT120C 万用表串入 da 支路（红表笔接 d 端，黑表笔接右边的散孔座），准备测量支路电流  $I_{da}$ ；

5. 将 ab 与 ac 支路上用于串入万用表+/-极的散孔座分别用短接线短接；
6. 检查电路连接没有错误后将 HPI-1000 口袋仪器与电脑连接，看看口袋仪器顶面的指示灯是否是绿色常亮状态，如果不是，请立即断开口袋仪器与电脑连接，重新检查电路是否正确连接；
7. 用 UT120C 万用表直流 mA 档测量支路电流  $I_{da}$ : 4.13mA
8. 把 UT120C 万用表串入 ba 支路（红表笔接 b 端，黑表笔接左边的散孔座），准备测量支路电流  $I_{ba}$ ；
9. 将 da 与 ac 支路上用于串入万用表+/-极的散孔座分别用短接线短接；
10. 用 UT120C 万用表直流 mA 档测量支路电流  $I_{ba}$ : -1.84mA
11. 把 UT120C 万用表串入 ac 支路（红表笔接 a 端，黑表笔接下边的散孔座），准备测量支路电流  $I_{ac}$ ；
12. 将 da 与 ba 支路上用于串入万用表+/-极的散孔座分别用短接线短接；
13. 用 UT120C 万用表直流 mA 档测量支路电流  $I_{ac}$ : 2.28mA
14. 根据节点电流定律（KCL）： $I_{da} + I_{ba} = I_{ac}$ ，实验结果与理论分析基本一致，基尔霍夫第一定律得到实验验证；
15. 实验中 ba 支路电流  $I_{ba} = -1.84mA$ ，说明实际电流方向与设定的电流方向正好相反，是由 a 点流向 b 点，因此在  $U_{s1}$ 、 $U_{s2}$  分别为+15V 和+5V 时，这个电路实际是左边 da 支路的电流在 a 点一分为二，一部分流入 ab 支路，剩下的一部分流入 ac 支路；
16. 改变  $U_{s1}$ 、 $U_{s2}$  电压源，重新进行基尔霍夫第一定律的验证，**注意：不要使用 HPI-1000 口袋仪器信号源作为电压源；**

## 实验 3 基尔霍夫第二定律 (KVL) 实验

### 实验目的

1. 通过实验理解掌握基尔霍夫第二定律 (KVL)
2. 结合基尔霍夫第一定律 (KCL) 实验, 分析基尔霍夫第一定律与第二定律间的关系

### 实验器材

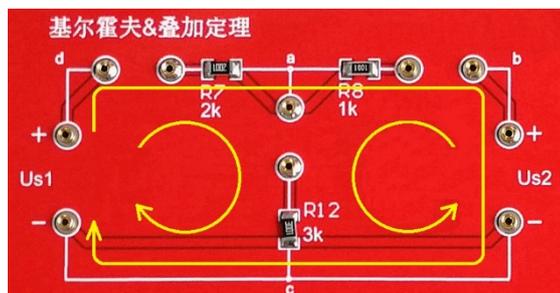
1. HA-MB03 实验板
2. 工具与配件:
  - a) UT120C 万用表
  - b) HPI-1000 口袋仪器
  - c) 短接线、剥线钳、镊子.....

### 实验要求

在 HA-MB03 实验板上基尔霍夫&叠加定理半定制实验区完成基尔霍夫定律第二验证, 并分析基尔霍夫第一定律与第二定律间的关系。

### 实验分析

上一个实验研究了基尔霍夫第一定律, 即结点电流定律 (KCL), 这个实验研究基尔霍夫第二定律, 即回路电压定律 (KVL): 在集总参数电路中, 任一时刻, 沿任一回路绕行一周 (顺时针方向或逆时针方向), 回路中各段电压的代数和恒等于零。该定律用来描述电路中任一回路上各段电压之间约束关系。



在 HA-MB03 实验板上基尔霍夫&叠加定理半定制实验区完成回路电压定律验证。从上图标注可以看出, 电路中存在 3 个回路, 分别是左回路 d-a-c-d; 右回路 b-a-c-b; 大回路 d-b-c-d, 按照回路电压定律 (KVL), 这 3 个回路各段电压的代数和都应该恒等于零。

与上一个实验要规定电流方向的表示规则一样, 这里首先要规定一下电压降的表示:  $U_{da} = U_d - U_a$ , 即 d 点的电压减去 a 点的电压。

### 实验流程 (通过 d-b-c-d 大回路验证 KVL 定律)

1. 把 HPI-1000 口袋仪器连接到 HA-MB03 实验板, 口袋仪器先不连接电脑;
2. 左边的  $U_{s1}$  电压源 +/- 极分别连接口袋仪器的 +15V 端与 GND 端;

3. 右边的  $U_{s2}$  电压源+/-极分别连接口袋仪器的+5V 端与 GND 端；
4. 将 d、a 两点间的散孔座用短接线连起来；将 a、b 间的散孔座用短接线连起来；a、c 间的散孔座保持断开状态；
5. 检查电路连接没有错误后将 HPI-1000 口袋仪器与电脑连接，看看口袋仪器顶面的指示灯是否是绿色常亮状态，如果不是，请立即断开口袋仪器与电脑连接，重新检查电路是否正确连接；
6. 用 UT120C 万用表电压档测量电阻 R7 上的电压  $U_{da}$ ： 6.66V，电阻 R8 上的电压  $U_{ab}$ ：3.34V；电压源  $U_{s1}$  实际电压：15.00V， $U_{s2}$  实际电压：5.00V；
7. 根据回路电压定律（KVL）： $U_{s1} = U_{da} + U_{ab} + U_{s2}$ ，将上面的测量的电压值代进去，等式也是成立的，基尔霍夫第二定律得到验证；
8. 仿照上面的步骤，利用左回路 d-a-c-d 和右回路 b-a-c-b 对回路电压定律（KVL）进行验证；

### 分析与思考

1. 上面通过 d-b-c-d 大回路验证 KVL 定律时 ac 支路上的电阻 R12 是断开的，如果接入电路，即 a、c 间的散孔座也用短接线连接，那电阻 R7 上的  $U_{da}$  与 R8 上的  $U_{ab}$  与上述测量值还一样吗？这种情况下 d-b-c-d 大回路 KVL 定律还成立吗？
2. 如上所示，当 R12 电阻接入电路，电路结构就与上一个验证基尔霍夫第一定律的实验电路完全一致了，试分析  $U_{da}$  与  $I_{da}$ ， $U_{ab}$  与  $I_{ab}$ ， $U_{ac}$  与  $I_{ac}$  的关系，基尔霍夫第一定律与第二定律间的关系；

参考答案见[附录 A](#)

## 实验 4 叠加定理实验

### 实验目的

通过实验理解掌握叠加定理

### 实验器材

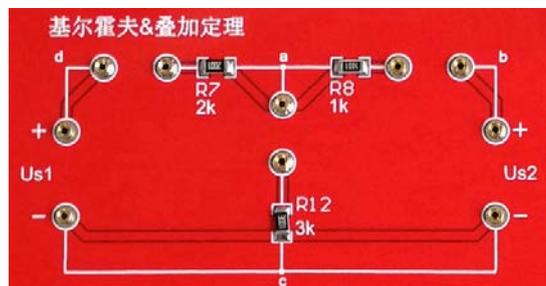
1. HA-MB03 实验板
2. 工具与配件：
  - a) UT120C 万用表
  - b) HPI-1000 口袋仪器
  - c) 短接线、剥线钳、镊子.....

### 实验要求

在 HA-MB03 实验板上基尔霍夫&叠加定理半定制实验区完成叠加定理验证。

### 实验分析

叠加定理指出：在多个独立源共同作用的线性电路中，任何一个支路的响应（电流或电压），都可以看成是由每个激励（理性电压源或理想电流源）单独作用时在该支路中产生的响应的叠加。该定理是线性电路的一个重要定理，体现了线性电路的基本特性——叠加性。



在 HA-MB03 实验板上基尔霍夫&叠加定理半定制实验区完成叠加定理验证。这个电路有  $U_{s1}$  和  $U_{s2}$  两个电压源，根据叠加定理，在两个电压源作用下  $ac$  支路电流  $I_{ac}$  应该等于分别只有  $U_{s1}$  或  $U_{s2}$  单个电压源作用下的电流  $I_{ac_1}$ 、 $I_{ac_2}$  之和。

### 实验流程

1. 把 HPI-1000 口袋仪器连接到 HA-MB03 实验板，口袋仪器先不连接电脑；
2. 左边的  $U_{s1}$  电压源+/-极分别连接口袋仪器的+15V 端与 GND 端；
3. 右边的  $U_{s2}$  电压源+/-极分别连接口袋仪器的+5V 端与 GND 端；
4. 把 UT120C 万用表串入  $ac$  支路（红表笔接  $a$  端，黑表笔接下边的散孔座），准备测量支路电流  $I_{ac}$ ；
5. 将  $da$  与  $ab$  支路上用于串入电流表+/-极的散孔座分别用短接线短接；
6. 检查电路连接没有错误后将 HPI-1000 口袋仪器与电脑连接，看看口袋仪器顶面的指示

灯是否是绿色常亮状态，如果不是，请立即断开口袋仪器与电脑连接，重新检查电路是否正确连接；

7. 用 UT120C 万用表直流 mA 档测量 ac 支路电流  $I_{ac}$ : 2.28mA
8. 把  $U_{s2}$  电压源从电路中移除:  $U_{s2}$  电压源+/-极断开与+5V 端、GND 端的连接，并用短接线短接起来；
9. 用 UT120C 万用表直流 mA 档测量此时 ac 支路电流  $I_{ac\_1}$ : 1.37mA
10. 恢复  $U_{s2}$  电压源+/-极与+5V 端与 GND 端的连接；
11. 把  $U_{s1}$  电压源从电路中移除:  $U_{s1}$  电压源+/-极断开与+15V 端、GND 端的连接，并用短接线短接起来；
12. 用 UT120C 万用表直流 mA 档测量此时 ac 支路电流  $I_{ac\_2}$ : 0.9mA
13. 根据叠加定理:  $I_{ac}=I_{ac\_1}+I_{ac\_2}$ , 这与上面的实际测量值基本吻合, 叠加定理得到验证;

## 实验 5 戴维南定理实验

### 实验目的

通过实验理解掌握戴维南定理

### 实验器材

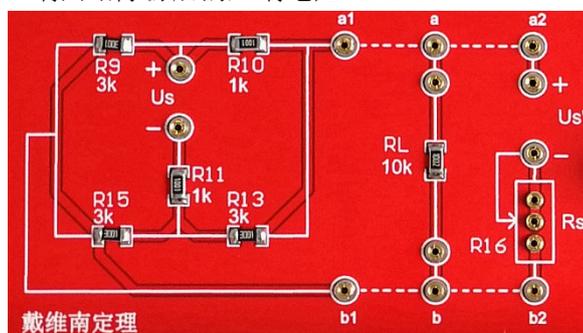
1. HA-MB03 实验板
2. 工具与配件：
  - a) UT120C 万用表
  - b) HPI-1000 口袋仪器
  - c) 短接线、剥线钳、镊子.....

### 实验要求

在 HA-MB03 实验板上戴维南定理半定制实验区完成戴维南定理验证

### 实验分析

戴维南定理指出：任何一个线性有源二端网络，对外电路而言，均可以用一个理想电压源和一个电阻元件相串联的有源支路（也称为戴维南等效电路）进行等效代替。等效代替条件是：有源支路理想电压源  $U_s'$  等于原二端网络的开路电压  $U_{a1b1}$ ；有源支路的电阻（又称等效内阻） $R_s'$  等于原有源二端网络除源后的入端电阻  $R_{a1b1}$ 。



戴维南定理实验电路

在上面的电路中把  $a$  与  $a1$ 、 $b$  与  $b1$  分别用短接线接起来，在左边的  $U_s$  加上一个电压源，这时候在负载电阻  $R_L$  上就会有电流流过，在  $R_L$  上出现电压降。当  $a$  与  $a1$ 、 $b$  与  $b1$  断开，分别与  $a2$ 、 $b2$  重新短接构成一个新的回路时，如果能找到一个合适的支路电压源  $U_s'$  和等效内阻  $R_s'$ ，使得  $R_L$  上出现电压降（也就是流经  $R_L$  的电流）与之前值一样，戴维南定理就得到验证。

### 实验流程

1. 把 HPI-1000 口袋仪器连接到 HA-MB03 实验板，口袋仪器先不连接电脑；
2. 把  $a$  与  $a1$ 、 $b$  与  $b1$  分别用短接线接起来，左边的  $U_s$  电压源  $+/-$  极分别连接口袋仪器的

+15V 与 GND 端;

3. 检查电路连接没有错误后将 HPI-1000 口袋仪器与电脑连接, 看看口袋仪器顶面的指示灯是否是绿色常亮状态, 如果不是, 请立即断开口袋仪器与电脑连接, 重新检查电路是否正确连接;
4. 用 UT120C 万用表测量负载电阻  $R_L$  两端的电压  $U_{ab}$ : 2.16V
5. 断开 a 与 a1、b 与 b1 的短接线, 测量左侧二端网络开路电压  $U_{a1b1}$ : 2.66V
6. 断开  $U_s$  电压源+/-极与口袋仪器+15V、GND 的连接后将  $U_s$ +/-极短接从而将左侧二端网络除源, 用 UT120C 万用表电阻档测量二端网络入端电阻  $R_{a1b1}$ : 2.29K $\Omega$
7. 在面包板上将套件中 10K $\Omega$  (103) 电位器调节到 2.29K $\Omega$  后接入右侧支路, 使得支路等效内阻  $R_{s'} = R_{a1b1}$ ;
8. 把 a 与 a2、b 与 b2 分别用短接线接起来, 右边的支路电压源  $U_{s'}$  的+/-极分别连接口袋仪器的 $\pm 12V$  与 GND 端;
9. 检查电路连接没有错误后打开 HPI-1000 口袋仪器上位机程序, 选择程序电源界面, 将程控电源电压调节到 2.7V, 使得支路电压源  $U_{s'}$  的电压与等于二端网络开路电压  $U_{a1b1}$ ;
10. 这时再用 UT120C 万用表测量负载电阻  $R_L$  两端的电压  $U_{ab\_2}$ : 2.14V,  $U_{ab\_2} \approx U_{ab}$ , 戴维南定理得到验证;
11. 改变实验步骤 2 中的  $U_s$  电压源电压值, 重新进行实验, 应该得到同样的结论;

## 实验 6 受控源实验

### 实验目的

初步掌握基于运算放大器的压控电压源与压控电流源结构与工作原理

### 实验器材

1. HA-MB03 实验板
2. 工具与配件：
  - a) UT120C 万用表
  - b) HPI-1000 口袋仪器
  - c) TI UA741 芯片
  - d) 短接线、剥线钳、镊子.....

### 实验要求

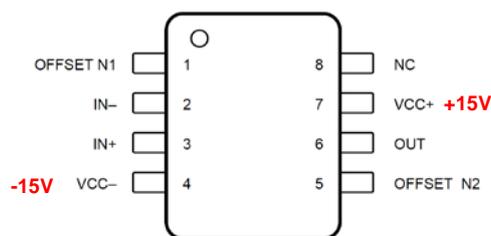
在 HA-MB03 实验板上受控源&二阶电路半定制实验区完成压控电压源与压控电流源电路搭建及测量。

### 实验分析

前面实验中用到了 HPI-1000 口袋仪器的+5V、+15V 固定电压源、 $\pm 12V$  程控电压源，以及 HA-MB03 电路板上的 10mA 电流源，这些电压源、电流源的特性都是自身决定的，称为独立源。还有一种电压源和电流源产生的电压或电流大小受到电路中存在的电压或电流控制，这种电压源或电流源称为受控源。受控源可以通过三极管、场效应管、集成运放等器件实现，本实验使用 TI UA741 运放芯片实现受控源。受控源分为 4 种类型，分别是：电压控制的电压源（压控电压源，VCVS）、电压控制的电流源（压控电流源，VCCS）、电流控制的电压源（流控电压源，CCVS）、电流控制的电流源（流控电流源，CCCS），这个实验先研究分析前两种，即：压控电压源（VCVS）和压控电流源（VCCS）。

#### 1. TI UA741 芯片介绍

这个实验的核心器件是 TI UA741 集成运放芯片，该芯片有 8 个引脚。



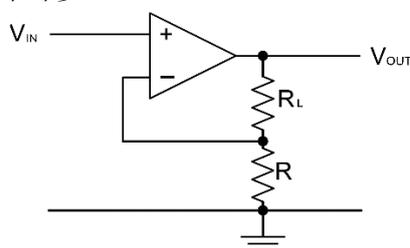
TI UA741

其中 VCC+和 VCC-已经连接到 HPI-1000 口袋仪器+15V、-15V 电源端，我们在搭建

电路时只要连接反向输入端 (IN-)、同向输入端 (IN+)、输出端 (OUT) 就行, 电压偏置端 (OFFSET N1/N2) 这个实验中不需要连接。

## 2. 压控电压源与压控电流源电路

这里首先介绍关于运放的两个基本概念: “虚短”和“虚断”。对于理想运放,  $V_{out} = A \times (V_+ - V_-)$ , 其中  $A$  是运放的开环电压放大倍数,  $V_+$ 和  $V_-$ 是同向输入端与反向输入端电压。对于理想运放而言,  $A$  取值无穷大, 因此有  $V_+ = V_-$ , 即我们认为运放的同向输入端 (+) 与反向输入端 (-) 的电位是相同的, 它们好像短接在一起一样, 这便是“虚短”的概念; 因为理想运放输入端的电阻无穷大, 因此我们认为同向端与反向端的输入电流都是零, 即  $I_+ = I_- = 0$ , 这便是“虚断”的概念。利用“虚短”与“虚断”的概念, 分析计算运放电路会变得简单许多。



压控电压源与压控电流源电路

对于上面的电路, 根据虚短概念, 电阻  $R$  上端的电压  $V_R = V_{in}$ ; 根据虚断的概念, 流经电阻  $R$  与  $R_L$  上的电流是相等的 (运放反向输入端无电流流入), 因此  $V_{out} = V_{in} / R \times (R + R_L)$ , 整理一下:  $V_{out} = V_{in} \times (1 + R_L / R)$ ; 这样输出电压就受输入电压控制, 比例系数是  $1 + R_L / R$ , 这就是一个压控电压源: 输入电压是  $V_{in}$  和 GND 之间的电压, 输出电压是  $V_{out}$  和 GND 之间的电压, 输出负载可以接入  $V_{out}$  和 GND 之间。

换一个角度, 如果我们把电路中的电阻  $R_L$  看成是负载本身, 因为流经  $R_L$  的电流只与输入电压  $V_{in}$  有关, 即:  $I_L = V_{in} / R$ , 所有, 上面的电路就可以看成是一个压控电流源, 只不过这个输出电流源是浮地的, 它和输入信号没有共同的 GND 端。

## 实验流程

1. 把 HPI-1000 口袋仪器连接到 HA-MB03 实验板, 口袋仪器先不连接电脑;
2. 在 UA741 的输出端与反向输入端之间串入一个  $1K\Omega$  的电阻  $R_L$ , 在反向输入端与 GND 之间串入一个  $1K\Omega$  的电阻  $R$ ;
3. 把 UA741 的同向输入端与 HPI-1000 的 +5V 连接;
4. 检查电路连接没有错误后将 HPI-1000 口袋仪器与电脑连接, 看看口袋仪器顶面的指示灯是否是绿色常亮状态, 如果不是, 请立即断开口袋仪器与电脑连接, 重新检查电路是否正确连接;

5. 用 UT120C 万用表测量 UA741 与 GND 之间的电压  $V_{out}$ : 9.98V，这与理论计算值  $V_{out}=V_{in}*(1+R_L/R)$  基本一致，如果我们把连接  $V_{in}$  到 HPI-1000 的 +3.3V 端，能够得到同样的结果；
6. 根据公式  $V_{out}=V_{in}*(1+R_L/R)$ ，当  $V_{in}=5V$ ， $R=1K\Omega$  时，如果选用  $10K\Omega$  的  $R_L$ ，可以得到 55V 的输出电压吗？通过实验我们发现是不可能的，无论我们怎么增大  $R_L$ ，UA741 的输出电压  $V_{out}$  不可能高于 +15V，这是由 UA741 芯片的电气特性决定的。

#### 6.4 Electrical Characteristics: $\mu A741C$

at specified virtual junction temperature  $V_{CC\pm} = \pm 15V$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>	MIN	TYP	MAX	UNIT	
$V_{IO}$	Input offset voltage	$V_O = 0$	25°C	1	6	mV
			Full range		7.5	
$\Delta V_{IO(Adj)}$	Offset voltage adjust range	$V_O = 0$	25°C	$\pm 15$		mV
$I_{IO}$	Input offset current	$V_O = 0$	25°C	20	200	nA
			Full range		300	
$I_{IB}$	Input bias current	$V_O = 0$	25°C	80	500	nA
			Full range		800	
$V_{ICR}$	Common-mode input voltage range	25°C		$\pm 12$	$\pm 13$	V
		Full range		$\pm 12$		
	<b>最大输出电压峰峰值</b>	$R_L \geq 10 k\Omega$	25°C	$\pm 12$	$\pm 14$	V
$V_{OM}$	Maximum peak output voltage swing	$R_L \geq 10 k\Omega$	Full range	$\pm 12$		
		$R_L = 2 k\Omega$	25°C	$\pm 10$		
		$R_L \geq 2 k\Omega$	Full range	$\pm 10$		
$A_{VD}$	Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 2 k\Omega$	25°C	20	200	V/mV
		$V_O = \pm 10V$	Full range	15		
$r_i$	Input resistance		25°C	0.3	2	M $\Omega$
$r_o$	Output resistance	$V_O = 0$ ; see <sup>(2)</sup>	25°C		75	$\Omega$
$C_i$	Input capacitance	25°C			1.4	pF
CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin}$	25°C	70	90	dB
			Full range	70		
$k_{SVS}$	Supply voltage sensitivity ( $\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$ )	$V_{CC} = \pm 9V$ to $\pm 15V$	25°C	30	150	$\mu V/V$
	<b>最大输出电流值</b>		Full range		150	
$I_{OS}$	Short-circuit output current	25°C		$\pm 25$	$\pm 40$	mA

#### TI UA741 主要电气特性

从上表我们可以看到，当供电电源  $V_{CC\pm} = \pm 15V$  时，输出电压峰值是不可能超出电源轨的，所以不可能得到超过 15V 的输出电压。同样，UA741 芯片的输出电流的最大值在 25mA 左右，这样也就约束了电路里电阻  $R$ 、 $R_L$  的以及输出负载电阻的取值，比如如果取  $R=R_L=100\Omega$ ，当  $V_{in}=5V$ ，根据公式  $V_{out}=V_{in}*(1+R_L/R)$ ，可以得到 10V 的输出电压，但是  $10V/200\Omega=50mA$ ，已经超过了 UA741 的最大输出电流能力范围，因此如果取  $R=R_L=100\Omega$ ，得到的输出电压低于 10V。

## 实验 7 一阶 RC 电路响应实验

### 实验目的

1. 深入理解一阶 RC 电路的充放电过程；
2. 学习时间常数  $\tau$  的测量；
3. 初步理解积分电路与微分电路；

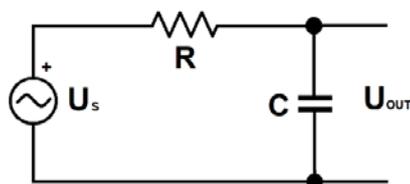
### 实验器材

1. HA-MB03 实验板
2. 工具与配件：
  - a) HPI-1000 口袋仪器
  - b) 短接线、剥线钳、镊子.....

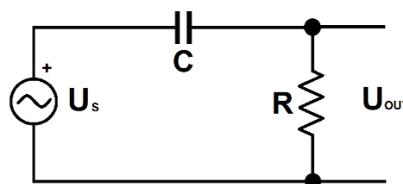
### 实验要求

选用 HA-MB03 实验板上 RLC 电路半定制实验区不同数值的电阻与电容组合成一阶 RC 电路，利用 HPI-1000 口袋仪器的信号源 AO1 作为激励源，研究电路的响应。

### 实验分析



一阶 RC 电路（积分电路）



一阶 RC 电路（微分电路）

一阶 RC 电路虽然简单，但是有很多重要性质，这些性质是研究后续更复杂电路的基础。同时一阶 RC 电路本身也有着重要的实用价值，它是积分电路和微分电路的基础。

首先研究积分电路，我们用 HPI-1000 口袋仪器的信号源 AO1 输出一个方波作为激励源  $U_s$ ，调整 AO1 信号的频率，使方波信号的周期  $T$  足够大，完成时间常数  $\tau$  的测量，并且与根据公式  $\tau=R \cdot C$  计算出的时间常数是否一致。然后改变激励信号的频率、 $R$  和  $C$  的值，以及电路的形态，看看电路的输出响应  $U_{out}$  有什么变化，并分析这些变化产生的原因。

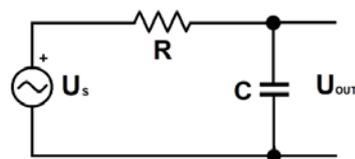
### 实验流程

**注意：实验中绝对禁止 HPI-1000 口袋仪器信号源 (AO1/AO2) 输出对地短路，否则会造成设备硬件损坏；**

1. 电阻选取  $5K\Omega$ ，电容选取  $100nF$ ，根据公式时间常数  $\tau=R \cdot C=0.5mS$ ；
2. 把 HPI-1000 口袋仪器连接到 HA-MB03 实验板，口袋仪器先不连接电脑；
3. 把 HPI-1000 口袋仪器信号源 AO1 分别示波器通道 1 (AI1) 和  $5K\Omega$  电阻一端；

4. 让 AO1 信号依次流经  $5\text{k}\Omega$  电阻和  $100\text{nF}$  电容，然后接到口袋仪器 GND 端；

5. 把电阻与电容间的公共端信号接入示波器通道 2 (AI2)，这个信号就是电容 C 上的输出信号  $U_{\text{out}}$ ，



这种电路结构称之为积分电路；

6. 检查电路连接没有错误后将 HPI-1000 口袋仪器与电脑连接，看看口袋仪器顶面的指示灯是否是绿色常亮状态，如果不是，请立即断开口袋仪器与电脑连接，重新检查电路是否正确连接；

7. 运行口袋仪上位机程序“口袋实验室”，如果口袋实验室工具条出现红色闪烁状态，说明口袋仪器 USB 驱动没有正确安装或是 USB 线没有正确连接，请退出“口袋实验室”程序并仔细检查；



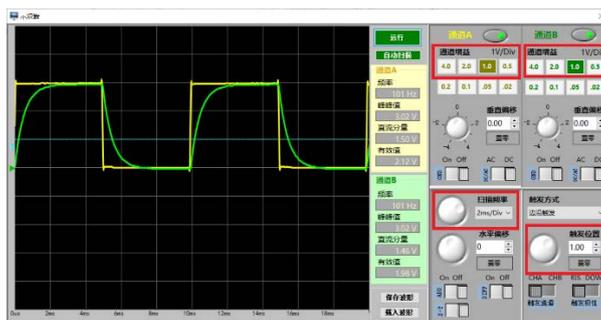
口袋实验室工具条

8. 启动“信号发生器”工具，把 AO1 信号波形选为“方波”，峰峰值设置为  $3\text{V}$ ，直流分量设置为  $1.5\text{V}$ 。根据步骤 1 中计算出的时间常数  $\tau=0.5\text{mS}$ ，激励信号的周期  $T>10\tau$  即可满足电容充足充放电，故方波信号频率选择  $100\text{Hz}$ ，其他采样默认设置即可；



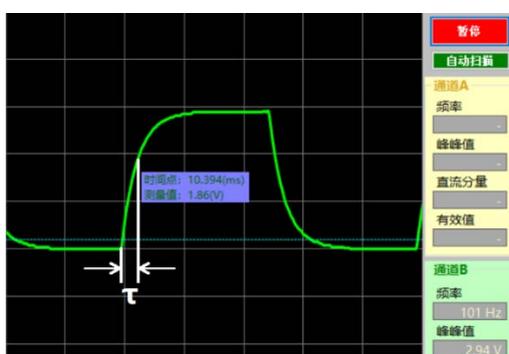
信号源设置

9. 打开示波器工具，把通道 1、通道 2 都打开，两个通道的增益设置都设为  $1\text{V/div}$ ，扫描频率设置为  $2\text{ms/Div}$ ；黄色的波形是激励信号  $U_s$ ，绿色的波波形是电容 C 上的波形  $U_{\text{out}}$ ，信号的幅值、频率以示波器界面的自动测量值为准；因为两个通道的信号都是在  $0\sim 3\text{V}$  间变化，必须把示波器触发电平从  $0\text{V}$  提高到  $0\sim 3\text{V}$  间任意值，否则信号会不停跳动；



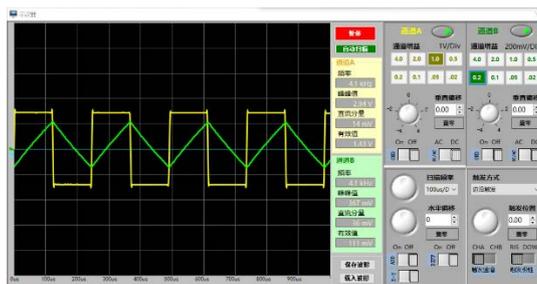
激励信号与输出信号波形

10. 根据公式  $U_{out}=U_s*(1-e^{-t/\tau})$ , 当  $t$  足够大时,  $U_{out}=U_s$ ;  $t=\tau$  时,  $U_{out}=U_s*0.632=U_{out}(\infty)*0.632$ , 即电容上的电压改变满量程的 0.632 倍时所需时间间隔就是电路的时间常数  $\tau$ ;



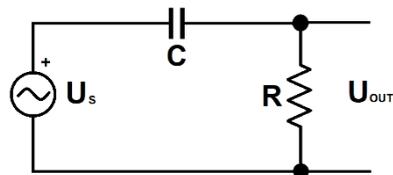
时间常数测量

11. 测量时间常数时可以把示波器通道 1 (激励信号) 关掉, 只剩下通道 2 信号  $U_{out}$  的波形, 然后再按下暂停键, 让波形保持稳定不抖动以便于测量, 通过  $U_{out}$  的上升沿或下降沿都可以测量时间常数  $\tau$ : 0.528ms, 这与理论计算值 0.5ms 相差不到 6%;
12. 以上测量都是基于激励信号周期  $T=20\tau$ , 让电容可以有充足的充放电时间, 如果电容充放电时间不足, 比如:  $T<\tau$ ,  $U_{out}$  波形会产生什么变化? 按照实验步骤 8 把激励信号  $U_s$  频率设置为 4KHz, 即  $T=1/2\tau$ , 这时  $U_{out}$  将变为近似的三角波, 因为没有足够的充放电时间, 充放电不完全,  $U_{out}<U_s$  (图片上  $U_{out}$  波形幅值不显得太小是因为调大了通道 2 的增益), 这种近似三角波的波形可以看作是对于激励信号的积分 (数学上方波信号的积分就是三角波), 因此这种电路也称为积分电路;

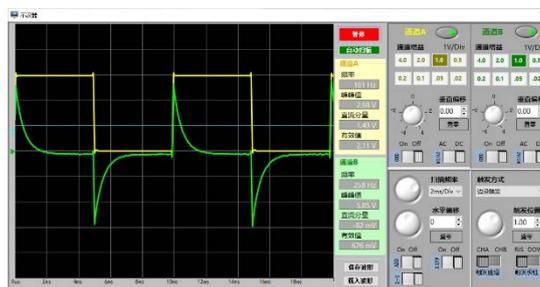


积分电路波形

13. 研究完积分电路我们继续研究微分电路，因为 HPI-1000 口袋仪器的示波器是单端示波器，负端固定接地，因此我们不可能在只简单的挪动一下 AI2 连线的位置就把积分电路测量改为微分电路测量。我们必须对电路结构做相应的调整，即让 AO1 信号先输出到电容 C 上，然后再连接电阻 R，最后接 GND 端构成回路；AI2 连接电容与电阻的公共端；



14. 重复实验步骤 8：启动“信号发生器”工具，把 AO1 信号波形选为“方波”，峰峰值设置为 3V，直流分量设置为 1.5V，信号频率选择 100Hz，其他采用默认设置即可；
15. 重复实验步骤 9，设置示波器，注意触发电平不要设置为零；

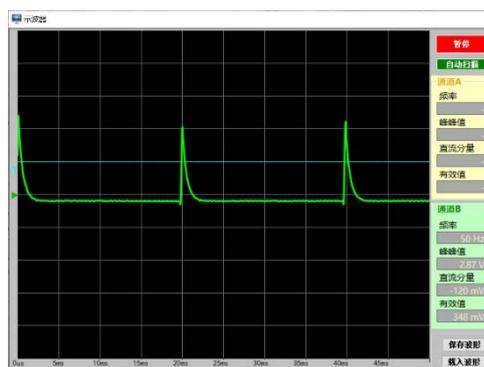


微分电路波形

16. 从示波器界面上可以看到，电阻 R 上的输出波形像是对方波做微分后得到的冲击响应信号，这与数学上的结果是一致的，因此这种电路结构称为微分电路；

## 分析与思考

1. 不改变微分电路结构与参数，只调整激励信号的参数，能否得到全正向的冲击响应输出信号  $U_{out}$ （见下图）？



参考答案见[附录 A](#)

## 实验 8 RLC 串联谐振实验

### 实验目的

1. 通过实验理解 RLC 串联谐振电路的基本概念与基本参数；
2. 初步掌握固有频率  $f_0$  与品质因数  $Q$  的计算与测量；
3. 学会分析测量值与理论值间误差产生的原因；

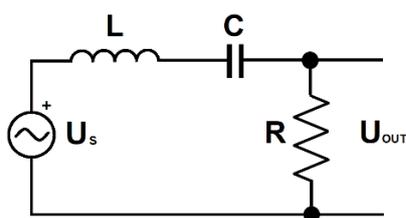
### 实验器材

1. HA-MB03 实验板
2. 工具与配件：
  - a) HPI-1000 口袋仪器
  - b) 短接线、剥线钳、镊子.....

### 实验要求

在 HA-MB03 实验板上 RLC 电路半定制实验区完成 RLC 串联谐振电路固有频率  $f_0$  的测量，品质因数  $Q$  的测量，并绘制幅频特性曲线。

### 实验分析



RLC 串联谐振电路

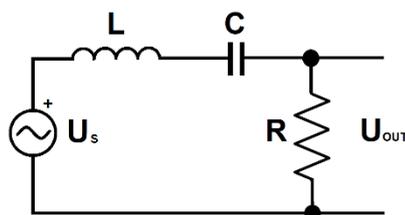
当我们把一个正弦激励信号  $U_s$  加入上面的 RLC 串联谐振电路，根据电路特性可知：当正弦激励信号  $U_s$  的频率  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  时，电路呈现电阻性，电路中的感抗  $\omega L$  与容抗  $1/\omega C$  相互“抵消”，电路中总电抗为零，我们称此时的  $f$  为 RLC 串联谐振电路的固有频率，记为  $f_0$ 。当正弦信号  $U_s$  的频率调整到  $f_0$  时，电路中的电感  $L$  与电容  $C$  似乎都“消失”了，因此理论上讲此时输出信号  $U_{out}$  的波形的幅值、频率及相位应该与激励信号  $U_s$  一致。我们可以用 HPI-1000 口袋仪器信号源 AO1 作为激励信号  $U_s$ ，然后利用口袋仪器的两路示波器通道分别观测  $U_s$  与  $U_{out}$ ，从而找出电路的固有频率  $f_0$ 。

RLC 串联谐振电路还有一个很重要的指标就是品质因数  $Q$ ， $Q = \sqrt{L/C}/R$ ，由此可见当电路中  $L$  与  $C$  的值固定后，品质因数  $Q$  只与电阻  $R$  有关。我们在实验中使用通频带法测量品质因数  $Q$ ，根据公式  $Q = f_0/(f_2 - f_1)$ ，其中  $f_1$  与  $f_2$  是  $U_{out}$  下降到 0.707 倍最大值时对应的激励信号频率， $BW = f_2 - f_1$  就是通频带带宽；我们测量出  $f_1$  与  $f_2$ ，就能计算出  $f_0$ 。

## 实验流程

**注意：实验中绝对禁止 HPI-1000 口袋仪器信号源 (AO1/AO2) 输出对地短路，否则会造成设备硬件损坏；**

1. RLC 谐振电路实验中的电感值选取 10mH，电容值选取 100nF，电阻值选取 2 个，分别是 300Ω 和 1KΩ，看看不同的阻值对于电路特性有哪些影响；
2. 把 HPI-1000 口袋仪器连接到 HA-MB03 实验板，口袋仪器先不连接电脑；
3. 把 HPI-1000 口袋仪器信号源 AO1 分别示波器通道 AI1 和 10mH 电感；
4. 让 AO1 信号依次流经 10mH 电感、100nF 电容和 300Ω 电阻，然后接到口袋仪器 GND 端；
5. 把电容与电阻间的公共端信号接入示波器通道 AI2，这个信号就是电阻 R 上的输出信号  $U_{out}$ ；
6. 检查电路连接没有错误后将 HPI-1000 口袋仪器与电脑连接，看看口袋仪器顶面的指示灯是否是绿色常亮状态，如果不是，请立即断开口袋仪器与电脑连接，重新检查电路是否正确连接；
7. 运行口袋仪上位机程序“口袋实验室”，如果口袋实验室工具条出现红色闪烁状态，说明口袋仪器 USB 驱动没有正确安装或是 USB 线没有正确连接，请退出“口袋实验室”程序并仔细检查；



口袋实验室工具条

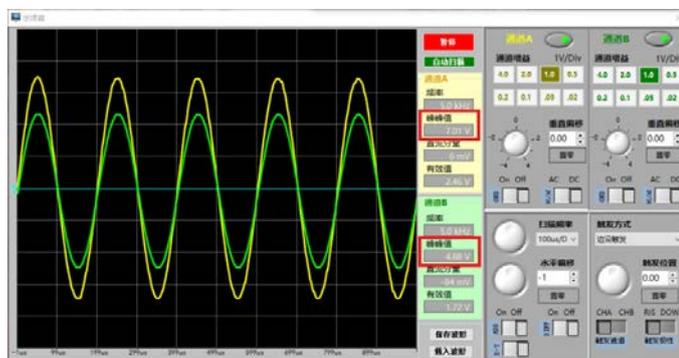
8. 首先启动“信号发生器”工具，AO1 信号波形选择正弦波，的峰峰值设置为 8V，频率设置为 5KHz，其他采样默认设置即可；



信号源设置

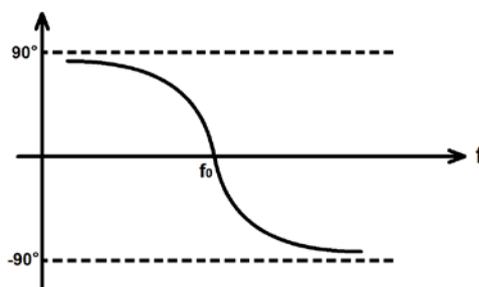
9. 打开示波器工具，把通道 1、通道 2 都打开，两个通道的增益设置都设为 1V/div，扫描频率设置为 100us/Div；黄色的波形是激励信号  $U_s$ ，绿色的吧波形是电阻 R 上的波形  $U_{out}$ ，信号的幅值、频率以示波器界面的自动测量值为准；
10. 根据公式  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，将  $L=10\text{mH}$ ， $C=100\text{nF}$  代入计算得： $f_0=5\text{KHz}$ ，即当激励信号  $U_s$

为 5KHz 正弦波时， $U_{out}$  信号与  $U_s$  信号幅值应该相同，但是实际测量  $U_{out}$  小于  $U_s$ ，这是因为电感  $L$  与电容  $C$  上都存在一些寄生阻抗，同时口袋仪器信号源输出电流有一定限制，而此时电阻  $R=300\Omega$  又比较小，因此  $U_{out}$  与  $U_s$  的幅值有一定差距，接下来我们把电阻  $R$  换为  $1K\Omega$  时， $U_{out}$  与  $U_s$  的幅值就比较接近了；



激励信号波形与输出信号波形

11. 接下来以 5KHz 为中心频率，100Hz 为步长，向低频端和高频段改变激励信号  $U_s$  的频率，理论上激励信号的频率不同，输出信号  $U_{out}$  的幅值也不同，最大的幅值对应的频率值就是固有频率  $f_0$ ，但实际上我们会发现用这种办法很难准确的找到  $f_0$ ，因为当  $U_s$  在 4.5~5.5KHz 时， $U_{out}$  的幅值相差不大；
12. 我们可以利用 RLC 串联谐振电路的相频特性来准确的找出电路固有频率  $f_0$ ，即当  $f=f_0$  时，输出信号  $U_{out}$  相对激励信号  $U_s$  没有相位差，否则将会有提前或措后的相位变化；



RLC 串联谐振电路相频曲线

13. 为了能更准确的找到固有频率  $f_0$ ，我们可以使用一些示波器调试技巧让波形显示更加清晰，易于展示需要的细节：
  - a) 把示波器的水平分辨率改为：20us/Div，这样屏幕上基本就只有一个周期的波形了，显示更加清晰；
  - b) 调节水平偏移旋钮，使波形显示在屏幕中间位置，便于观察；
  - c) 可以选择上升沿（RIS）触发还是下降沿（DOW）触发，使波形延水平轴翻转；
  - d) 可以按下“暂停”按钮，使屏幕静止，减小波形抖动；
  - e) 将鼠标放在波形上检测鼠标指示点波形的时间点和幅值；

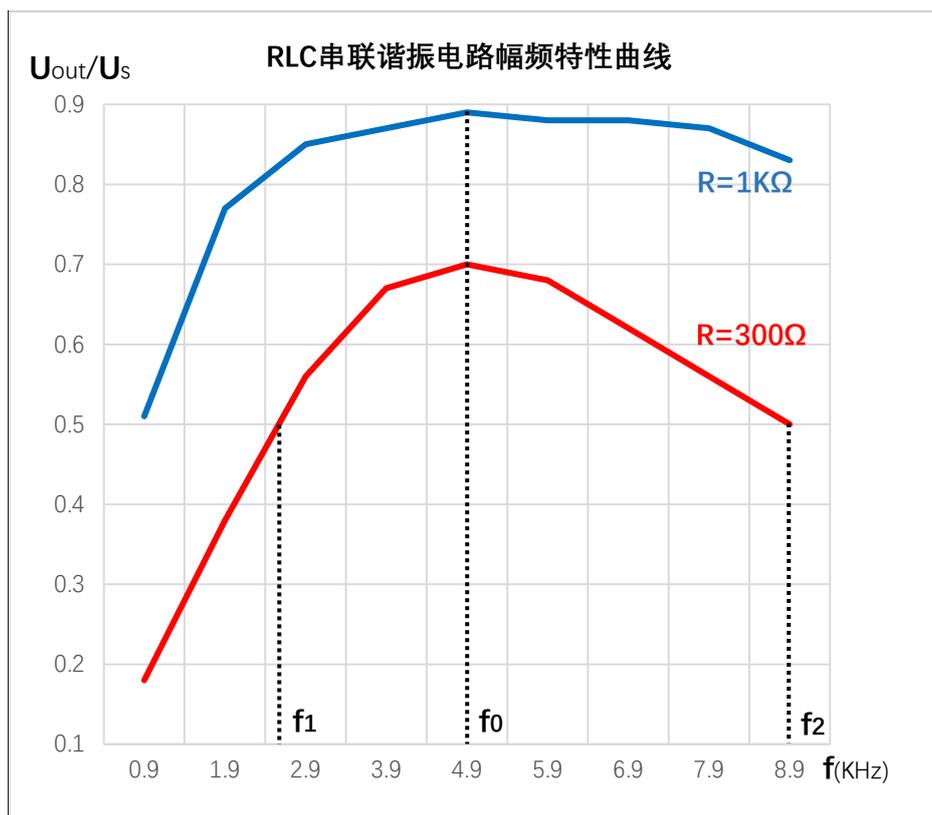


确定  $U_s$  与  $U_{out}$  信号相位差是否为零

14. 当  $U_s$  与  $U_{out}$  信号相位差为零时， $U_s$  波形（黄色）与  $U_{out}$  波形（绿色）的两个交叉点应该在同一水平线上，利用这种方法可以相对比较精确的找到  $f_0$ : 4.9KHz；
15. 以  $f_0$  为中心频率，在其左右各选 4 个频率点，频率间隔 1KHz，加上  $f_0$  一共 9 个频率点，测量这 9 个频率点  $U_s$  与  $U_{out}$  信号的峰峰值，填入下表：

频率	f(KHz)	0.9	1.9	2.9	3.9	4.9	5.9	6.9	7.9	8.9
R=300Ω	$U_s(V)$	7.86	7.64	7.42	7.19	7.08	7.12	7.23	7.36	7.36
	$U_{out}(V)$	1.42	2.94	4.12	4.81	4.96	4.83	4.47	4.14	3.69
	$U_{out}/U_s$	0.18	0.38	0.56	0.67	0.70	0.68	0.62	0.56	0.50
R=1KΩ	$U_s(V)$	7.68	7.57	7.55	7.55	7.45	7.51	7.51	7.53	7.58
	$U_{out}(V)$	3.91	5.8	6.41	6.60	6.62	6.63	6.58	6.56	6.3
	$U_{out}/U_s$	0.51	0.77	0.85	0.87	0.89	0.88	0.88	0.87	0.83

16. 以频率为横轴， $U_{out}/U_s$  为纵轴，绘制 RLC 串联谐振电路幅度-频率特性曲线，将  $R=300\Omega$  与  $R=1K\Omega$  时的两条曲线绘制在同一幅图表中进行比较：我们可以看出无论电阻  $R$  取值  $300\Omega$  还是  $1K\Omega$ ，通过实验测得的电路固有频率都是  $4.9KHz$ ，这与理论分析是一致的，即：固有频率只与电感  $L$  和电容  $C$  有关，与电阻  $R$  无关。但是根据公式  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，计算得出的固有频率  $f_0=5.0KHz$ ，实际测得的是  $4.9KHz$ ，存在 2% 的误差，这是因为实验用的电感、电容、电阻元件的实际值都与标称值存在一定的误差，比如：实验用电阻的精度范围一般是  $\pm 5\%$ ，电容、电感的精度范围是  $\pm 10\%$  或是  $\pm 20\%$ 。



RLC 串联谐振电路幅频特性曲线

17. 根据公式  $Q=f_0/(f_2-f_1)$ ，计算电路的品质因数  $Q$ ，其中  $f_1$  与  $f_2$  是  $U_{out}/U_s$  下降到 0.707 倍时的频率，实际测量： $f_1$ : 2.6KHz， $f_2$ : 8.9KHz，代入上面公式，计算得  $Q$ : 0.78，这与理论计算得到的  $Q=\sqrt{L/C}/R\approx 1$  有一定误差，造成这种误差的原因在与电感  $L$  与电容  $C$  上都存在一定的寄生阻抗，尤其当激励信号频率较高时候，寄生阻抗不能忽略，因此通过实验实测出的品质因数  $Q$  往往都小于理论计算值。
18. 教科书上绘制的 RLC 串联谐振电路幅频特性曲线一般都是关于  $f_0$  左右对称的一条曲线，这实际是当  $Q$  值很大时的理想曲线，当  $Q<100$  时曲线会呈现明显的不对称，其中的原因分析起来比较复杂，这里不做赘述。有兴趣的老师与同学可以百度安徽师范大学陆同兴、台启权的论文《关于 RLC 电路谐振特性曲线的对称性问题》。

## 附录 A 部分思考题参考答案

### 实验 3：基尔霍夫第二定律（KVL）实验

- ac 支路上的电阻 R12 串入电路，即 a、c 间的散孔座也用短接线连接，这种情况下 d-b-c-d 大回路 KVL 定律依然成立，但是电阻 R7 上的电压  $U_{da}$  和 R8 上的电压  $U_{ab}$  与之前的测量值不同了，此时  $U_{da} = \underline{8.17V}$ ， $U_{ab} = \underline{1.82V}$ ；依然满足回路电压定律（KVL）： $U_{s1} = U_{da} + U_{ab} + U_{s2}$ 。
- 根据欧姆定律： $U_{da} = I_{da} * R7$ ， $U_{ab} = I_{ab} * R8$ ， $U_{ac} = I_{ac} * R12$ ，实验 3、4 的电路结构与参数完全一样，所以实际测量值也满足上述关系；通过两个实验的比较分析，我们可以深入理解欧姆定律、基尔霍夫第一与第二定律三者之间是存在内在联系成为一个整体的。

### 实验 7：RC 一阶电路实验

- 不改变微分电路结构与参数，只调整激励信号的参数，能否得到全正向的冲击响应输出信号  $U_{out}$ ？

答：可以，只要将激励信号调整为三角波，并且将占空比调整为 100%， $U_s$  变为具有阶跃信号上升沿的锯齿波，经过微分后就能得到全正向的冲击响应波形（见下图）；同理，如果将占空比调整为 0%， $U_s$  变为具有方波信号下降沿的锯齿波，经过微分后就能得到全负向的冲击响应波形，大家可以自己试试。

