TPE-DG2L 电路分析实验箱

实 验 指 导 书

清华大学科教仪器厂

**目 录**

实验一 元件的伏安特性的测试 （1）

实验二 基尔霍夫定律 （7）

实验三 叠加定理 （9）

实验四 戴维南定理 ………………………………………………………

（12）

实验五 运算放大器和受控源 ……………………………………………

（17）

实验六 含有受控源电路的研究 …………………………………………

（25）

实验七 简单万用表线路计算与校检 ……………………………………

（29）

实验八 一阶、二阶动态电路研究 （39）

实验九 R、L、C 元件性能的研究 …………………………………………

（44）

实验十 RLC 串联电路的幅频特性和谐振现象 …………………………

（48）

实验十一 RC 电路频率特性的研究 （52）

实验十二 有源滤波器 ……………………………………………………

（56）

实验十三 交流电路中的互感 ……………………………………………

（65）

实验十四 二端口网络的研究 ……………………………………………

（69）

实验十五 负阻抗变换器 …………………………………………………

（73）

实验十六 回转器 …………………………………………………………

（76

# 实验八 一阶、二阶动态电路

一、实验目的

1. 加深对 RC 微分电路和积分电路过渡过程的理解。
2. 研究 *R* 、 *L* 、*C* 电路的过渡过程。**二、实验说明**
3. 用示波器研究微分电路和积分电路。
4. 微分电路

微分电路在脉冲技术中有广泛的应用。 在图 8-1 电路中，

*usc*

 *Ri*  *RC duc*

*dt*

(1)

即输出电压usc 与电容电压uc 对时间的导数成正比。当电路的时间常数  RC

很小,

uc  usc 时, 输入电压usr 与电容电压uc 近似相等

usr

 uc

(2)

将(2)代入(1)得

usc

 RC dusr

dt

(3)

即: 当 很小时, 输出电压usc 近似与输入电压usr 对时间的导数成正比, 所以

称图 8-1 电路为“微分电路”。

i C

▲

uc

**+**

**+**

usr

R usc

i

usr

**+**

**+**

▲

R

### u R

**+**

C **\_**usc

**+**

图 8-1 图 8-2

1. 积分电路

将图 8-1 电路中的 R、C 位置对调, 就得到图 8-2 电路。电路中

usc  C

1

idt  1

C





u R dt  1 R RC

u R dt

(4)

即输出电压usc 与电阻电压u R 对时间的积分成正比。



当电路的时间常数  RC 很大、u R  usc 时, 输入电压usr 与电阻电压u R

近似相等,

usr

 u R

(5)

将(5)代入(4)时



usc  RC

1

usr dt

(6)

即: 当 很大时, 输出电压usc 近似与输入电压usr 对时间的积分成正比, 所以

称图 8-2 电路为“积分电路”。

1. *R* 、 *L* 、*C* 电路的过渡过程。
2. 将图 8-3 电路接至直流电压, 当电路参数不同时,电路的过渡过程有不同的特点:

**+**

usr

**\_**

iL

L

**+**

usc

**\_**

▲

▲

### R

usr

**\_**

L

C

**\_**

**+**

i R

iC

当 *R*  2

usc

图 8-3 图 8-4

**+**

时, 过渡过程中的电压、电流具有非周期振荡的特点。

*L*

*C*

当 *R*  2

*L*

*C*

*LC*

时，过渡过程中的电压、电流具有“衰减振荡”的特点：此时

衰减系数** 

*R*

2*L* ,**0 

1 是在 *R*  0 情况下的振荡角频率，习惯上称为无阻

尼振荡电路的固有角频率， 在 *R*  0 时， 放电电路的固有振荡角频率

** 将随** 

**2 **2

0

*R* 增加而下降，

2*L*

**2 **2

0

当电阻 *R*  2

*L*

*C*

时，**  **0 ，**

 0 过程就变为非振荡性质了。

1. 将图 8-4 电路接直流电压,当电路参数不同时,其过渡过程也有不同的特点:
2. *L*
3. *C*

当 *R*  时, 响应是非振荡性质的。

当 *R* 

1. *L*
2. *C*

时，响应将形成衰减振荡。这时电路的衰减系数** 

1 。

2*RC*

1. 如何用示波器观察电路的过渡过程

电路中的过渡过程,一般经过一般时间后,便达到稳定。由于这一过程不是重复的，所以无法用普通的阴极示波器来观察（因为普通示波器只能显示重复出现的、即周期性的波形）。为了能利用普通示波器研究一个电路接到直流电压时的过渡过程，可以采用下面的方法。

t1 t2 t3 t4 t

▲

U0

▲

▲

T

▲

图 8-5

在电路上加一个周期性的“矩形波”电压(图 8-5)。它对电路的作用可以这样来理解：在*t*1 、*t*3 等时刻，输入电压由零跳变为*U* 0 ,这相当于使电路突然在与一个直流电压*U* 0 接通；在*t*2 、*t*4 等时刻， 输入电压又由*U* 0 跳变为

零，这相当于使电路输入端突然短路。由于不断地使电路接通与短路，电路中便出现重复性的过渡过程，这样就可以用普通示波器来观察了。如果要求在矩形波作用的半个周期内，电路的过渡过程趋于稳态，则矩形波的周期应足够大。

三、仪器设备

1. 双踪示波器 1 台
2. 方波发生器 1 台
3. 电路分析实验箱 1 台**四、预习内容**
4. 图 8-6 电路中设; u 入为一阶跃电压, 其幅度为 U=3V; C=20F。试分别画出 R=100K, R=10K。R=1K 时 u 出的曲线。

### R

u**入**

C

u**出**

u**入**

▲

图 8-6

1. 图8-7 电路中设u 入为一矩形脉冲电压, 其幅度为U=6 伏, 频率为1KHZ, C=0.033F, 试分别画出 R=100K 及 R=10K 时 u 出的波形。

u**入** ▲ C

2

1 m

2

1m

t

u**入** u**出**

R

▲

▲

图 8-7

▲

1. 图 8-8 电路中，设 u 入为一矩形脉冲电压，其幅度为 U=6 伏, 频率为

1KHZ, C=0.033F, R=10K。试画出 u 出的波形。

u**入** ▲ C

2

1 m

2

1m

t

u**入** u**出**

R

▲

▲

图 8-8

▲

1. 已知图 8-3, *R* 、*L* 、*C* 串联电路中,

*L*  0.2*H* ,

*C*  0.02*f* ,定性判

断 *R*  2*K* 及 *R*  11*K* 两种情况下*uc* 的波形是否振荡。

五、实验内容与步骤

1．按图 8-9 接线, 用示波器观察作为电源的矩形脉冲电压。周期 T=1ms。

2．按图 8-10 接线, 使 R 为 10K, 分别观察和记录 C=0.01、0.1、1荧光屏上显示的波形。



方 波

发生器

示波器

x

y



C

方 波

发生器

R

示波器

x y

图 8-9 图 8-10

1. 按图 8-11 接线。使 R 为 10K, 分别观察和记录 C=0.5、0.01两种情况下荧光屏上显示的波形。



### R

方 波发生器

C 示波器

x y

图 8-11

1. 按图 8-3 电路接线 L=0.2*H*,

*C*  0.1*f* 接入*T*  10*ms* 的矩形脉冲观察

并描绘 *R*  500 及 *R*  2*K* 两种情况下的*usc* 波形。记录必要的数据。

1. 按图 8-4 接线 *L*  0.2*H* , *C*  0.1*f* 接入*T*  10*ms* 的矩形脉冲观察并描

绘 *R*  4*K* 及 *R*  500 ,

*R*270 三种情况下的*usc* 波形并记录必要的数据。

六、实验报告要求

1. 将实验任务 1、2、3、4、5 中记录的波形整理在坐标纸上。
2. 总结微分和积分电路区别。

# 实验九 *R*、*L*、*C*元件性能的研究

一、实验目的

1. 用伏安法测定电阻、电感和电容元件的交流阻抗及其参数 *R* 、*L* 、*C* 之值。
2. 研究 *R* 、 *L* 、*C* 元件阻抗随频率变化的关系。
3. 学会使用交流仪器。

二、实验说明 i



**U R**

电阻、电感和电容元件都是指理想的线性二端元件。

1. 电阻元件：在任何时刻电阻两端的电压与通过它 **R**

的电流都服从欧姆定律。即

*uR*  *Ri*

式中 *R*  *uR* / *i* 是一个常数，称为线性非时变电阻，其大小与*uR* 、*i* 的大小

及方向无关，具有双向性。它的伏安特性是一条通过原点的直线。在正弦电路中，电阻元件的伏安关系可表示为：

*U R*  *RI*

式中 *R*  *U R* 为常数，与频率无关，只要测量出电阻端电压和其中的电流便可

*I*

计算出电阻的阻值。电阻元件的一个重要特征是电流 *I* 与电压*U R* 同相。

1. 电感元件 **i**



**U L**

电感元件是实际电感器的理想化模型。它

只具有储存磁场能量的功能。它是磁链与电流相 **L**

约束的二端元件。即：

*L* (*t*)  *Li*

式中 *L* 表示电感，对于线性非时变电感，*L* 是一个常数。电感电压在图示关联

参考方向下为：

*u*  *L di*

*L dt*

在正弦电路中：*U L*  *JX L I*

式中 *X L*  *L*  2*fL* 称为感抗，其值可由电感电压、电流有效值之比求得。

即 *X*  *UL* 。当 *L*  常数时，*X* 与频率 *f* 成正比， *f* 越大，*X* 越大， *f* 越小，

*L I L L*

*X L* 越小，电感元件具有低通高阻的性质。若 *f* 为已知，则电感元件的电感为：

*L*  *X L*

2*f*

（9-1）

理想电感的特征是电流 *I* 滞后于电压**

2

1. 电容元件：

电容元件是实际电容器的理想化模型，它只具有储存电场能量的功能，它是电荷与电压相约束的元件。即：

*q*(*t*)  *Cuc*

式中*C* 表示电容，对于线性非时变电容，*C* 是一个常数。电容电流在关联

参考方向下为：

**i**

*i*  *C duc*



**U C**

*dt*

**C**

在正弦电路中 *I* 

*U* *c*

* *J**X c*

或*Uc*

 *J**X*

*c I*

式中 *X c*

 1 

*C*

1

2*fc*

称为容抗。其值为 *X c*

 *Uc* ，可由实验测出。当*C* =

*I*

常数时， *X c* 与 *f* 成反比， *f* 越大， *X c* 越小， *f*   ， *X c*  0 电容元件具有高

通低阻和隔断直流的作用。当 *f* 为已知时，电容元件的电容为：

*C*  1 2*fX c*

（9-2）

电容元件的特点是电流 *I* 的相位超前于电压**。

2

三、仪器设备

1. 电路分析实验箱 一台

（用 RLC 串联与谐振电路部分的元件参数）

1. 功率信号发生器 一台

**C**

**R**



**A**

**V**

**正弦信号发生器**

1. 交流毫伏表 一只

3. 数字万用表 一只 **L**

四、实验内容与步骤

1. 测定电阻、电感和电

容元件的交流阻抗及其参数： 图 9-1

1. 按图 9-1 接线确认无误后，将信号发生器的频率调节到 50Hz，并保持不变，分别接通 *R* 、*L* 、*C* 元件的支路。改变信号发生器的电压（每一次都要用万用表进行测量），使之分别等于表 9-1 中的数值，再用万用表测出相应的电流值，并将数据记录于表 9-1 中。（注意：电感 *L* 本身还有一个电阻值）

*f*  50Hz 表 9-1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 信号发生器输出元件电流  电压  被测元件 | *U* （伏） | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| *R* =1K | *I R*（毫安） |  |  |  |  |  |  |
| *L* =0.2H | *I L*（毫安） |  |  |  |  |  |  |
| *C* =2F | *IC*（毫安） |  |  |  |  |  |  |

1. 以测得的电压为横坐标，电流为纵坐标，分别作出电阻、电感和电容元件的有效值的伏安特性曲线（均为直线），如图 9-2 所示。在直线上任取一点 A，过 A 点作横轴的垂线，交于 B 点，则 OB 代表电压，AB 代表电流，则

*R*  *UR*  *OB*

**I**

**A**

**B**

同理：

*I*

*X*  *U L*

*L I*

*X*  *Uc*

*c I*

*AB*

 *OB*

*AB*

 *OB*

*AB*

**0 U**

图 9-2

再按式 9-1，9-2 计算出 *L* 和*C* （此项可留到实验报告中完成）。

1. 测定阻抗与频率的关系：
2. 按图 9-1 接线，经检查无误后，把信号发生器的输出电压调至 5 伏，分别测量在不同频率时，各元件上的电流值，将数据记入表 9-2 中。测量 *L* 、*C* 元件上的电流值时，应在 *L* 、*C* 元件支路中串联一个电阻 *R* =100，然后用交流毫伏表测量电阻上的电压，通过欧姆定律计算出电阻上的电流值，即 *L* 、*C* 元件上的电流值。（注意：电感 *L* 本身还有一个电阻值）

*U* =5 伏 表 9-2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 被测元件 | *R* =1K | | | *L* =0.2H | | | *C* =2F | | |
| 信号源频率(Hz) | 50 | 100 | 200 | 50 | 100 | 200 | 50 | 100 | 200 |
| 电流(A) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 阻抗() |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

1. 把图 9-1 中，*R* 、*L* 、*C* 全部并联接入电路中，保持信号源频率 *f* =50Hz，

输出电压*U* =5 伏，测量各支路电流及总电流，从而验证基尔霍夫电流定律的正确性。

五、思考题

1. 根据实验结果，说明各元件的阻抗与哪些因素有关？并比较 *R* 、*L* 、*C* 元件在交、直流电路中的性能。
2. 对实验内容 2 进行分析，从理论上说明总电流与各支路电流的关系。
3. 你能分析出产生本次实验误差的原因吗？ **六、实验报告要求**

1. 按要求计算各元件参数。2. 回答思考题 1、2、3。

# 实验十 RLC 串联电路的幅频特性与谐振现象

一、实验目的

1. 测定 *R、L、C* 串联谐振电路的频率特性曲线。
2. 观察串联谐振现象，了解电路参数对谐振特性的影响。**二、实验原理**
3. *R、L、C* 串联电路(图 10-1)的阻抗是电源频率的函数，即：

*Z*  *R*  *j*(*L* 

1 )  *Z e j*

*C*

当*L*  1

*C*

时，电路呈现电阻性，*U s* 一定时，电流达最大，这种现象称为

串联谐振，谐振时的频率称为谐振频率，也称电路的固有频率。即

*LC*

2* LC*

0

**0 

1 或 *f*  1

上式表明谐振频率仅与元件参数 *L、C* 有关，而与电阻 *R* 无关。

C



L

. + ~~.~~ I

US -

R

图 10-1

1. 电路处于谐振状态时的特征：

① 复阻抗 *Z* 达最小，电路呈现电阻性，电流与输入电压同相。

② 电感电压与电容电压数值相等，相位相反。此时电感电压(或电容电压) 为电源电压的 *Q* 倍，*Q* 称为品质因数，即

*Q*  *U L*

*U S*

 *UC*

*U S*

 **0 *L* 

*R*

1 

**0 *CR*

1 *L*

*R C*

在 *L* 和 *C* 为定值时，*Q* 值仅由回路电阻 *R* 的大小来决定。

③ 在激励电压有效值不变时，回路中的电流达最大值，即：

*I*  *I* 0

1. 串联谐振电路的频率特性：

 *U S*

*R*

① 回路的电流与电源角频率的关系称为电流的幅频特性，表明其关系的图形称为串联谐振曲线。电流与角频率的关系为：

*I* (**)  *U S*  *U S*

*R* 2 *L*  



1  2



*c* 

*R* 1  *Q* 2 

 ** **  2

**0

 0 

** 

 *I* 0

当 *L、C* 一定时，改变回路的电阻 *R* 值，即可得到不同 *Q* 值下的电流的幅频特性曲线(图 10-2)。显然 *Q* 值越大，曲线越尖锐。

1  *Q* 2 

 ** **  2

**0

 0 

** 

###### I

Q 1〉Q

Q 1

Q 2

2

0 ω 0 ω

图 10-2

有时为了方便，常以 ** 为横坐标， *I* 为纵坐标画电流的幅频特性曲线(这

**0 *I* 0

称为通用幅频特性)，图 10-3 画出了不同 *Q* 值下的通用幅频特性曲线。回路的

品质因数 *Q* 越大，在一定的频率偏移下，

好。

*I* 下降越厉害，电路的选择性就越

*I* 0

为了衡量谐振电路对不同频率的选择能力引进通频带概念，把通用幅频特性的幅值从峰值 1 下降到 0.707 时所对应的上、下频率之间的宽度称为通频带(以 *BW* 表示)即：

*BW*  **2

**0

 **1

**0

由图 10-3 看出 *Q* 值越大，通频带越窄，电路的选择性越好。

③ 激励电压与响应电流的相位差**角和激励电源角频率**的关系称为相频特性，即：

*L*  1

**(**)  *arctg c*  *arctg X*

*R R*

显然，当电源频率**从 0 变到** 时，电抗 *X* 由 变到 0 时，**角从 ** 变

0 2

到 0，电路为容性。当**从**0 增大到 时，电抗 *X* 由 0 增到 ，**角从 0 增到

**，电路为感性。相角**与 ** 的关系称为通用相频特性，如图 10-4 所示。

2 **0

I 0 **

I

Q 1〉Q 2

Q 2

Q 1

1

Q 1〉Q 2

Q1

Q

2

1

2

1

0.707

π 2

ω

0 ω 0

0 ω '1 ω 1 ω 2 ω '2

ω 0 ω 0 ω 0 ω 0

ω π

2 ω 0 2

图 10-3 图 10-4

谐振电路的幅频特性和相频特性是衡量电路特性的重要标志。**三、仪器设备**

1. 电路分析实验箱 一台
2. 信号发生器 一台
3. 交流毫伏表 一台
4. 双踪示波器 一台**四、实验内容及步骤**

按图 10-5 连接线路，电源*U* *S* 为低频信号发生器。将电源的输出电压接示

波器的*YA* 插座，输出电流从 *R* 两端取出，接到示波器的*YB* 插座以观察信号波形，取 *L*  0.1H ， *C*  0.5**F ， *R*  10Ω，电源的输出电压*U S*  3 V。

. +



示波器

L

C

R

YB

YA

US

-

图 10-5

1. 计算和测试电路的谐振频率

① *f* 0  用 *L、C* 之值代入式中计算出 *f* 0 。

2* LC*

1

② 测试：用交流毫伏表接在 *R* 两端，观察*U R* 的大小，然后调整输入电源的频率，使电路达到串联谐振，当观察到*U R* 最大时电路即发生谐振，此时的频率即为 *f* 0 (最好用数字频率计测试一下)

1. 测定电路的幅频特性

① 以 *f* 0 为中心，调整输入电源的频率从 100Hz~2000Hz，在 *f* 0 附近，应多取些测试点。用交流毫伏表测试每个测试点的*U R* 值，然后计算出电流 *I* 的值， 记入表格 10-1 中。

表 10-1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f* (Hz) |  |  |  |  |  |  | *f* 0 |  |  |  |  |  |  |  |
| *U R* (mV) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| *I*(mA) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

② 保持*Us* =3V，*L*=0.1H，*C*=0.5F，改变 *R*，使 *R*  100 ，即改变了回路

*Q* 值，重复步骤①。

1. 测定电路的相频特性

仍保持*US* =3V，*L*=0.1H，*C*=0.5F， *R*  10 。以 *f* 0 为中心，调整输入电源的频率从 100Hz~2000Hz。在 *f* 0 的两旁各选择几个测试点，从示波器上显示的电压、电流波形上测量出每个测试点电压与电流之间的相位差** *u*  *i* ， 数据表格自拟。

五、思考题

1. 用哪些实验方法可以判断电路处于谐振状态？
2. 实验中，当 *R、L、C* 串联电路发生谐振时，是否有*Uc*  *U L* 及*U R*  *U S* ？ 若关系不成立，试分析其原因。

六、实验报告要求

1. 根据实验数据，在坐标纸上绘出两条不同 *Q* 值下的幅频特性曲线和相频特性曲线，并作扼要分析。(计算电流 *I* 0 注意：L 不是理想电感，本身含有电阻，而且当信号的频率较高时电感线圈有肌肤效应，电阻值会有增加，可先测量出的*Uc*、*US* 求出 Q 值，然后根据已知的 L、C 算出总电阻。)
2. 通过实验总结 *R、L、C* 串联谐振电路的主要特点。
3. 回答思考题 2。

# 实验十一 *RC* 电路频率特性的研究

一、实验目的

1. 研究 *RC* 电路的频率特性。
2. 初步了解文氏电路的应用，组成正弦波振荡器。**二、实验说明**
3. 文氏电路

在谐振实验里，研究了 *RLC* 电路的频率特性。本实验研究 *RC* 串并联选频

电路(文氏电路)的频率特性。图 11-1(a)为文氏电路。在输入端输入幅度恒定的正弦电压*U* *i* ，在输出端得到输出电压*U* 0 ，分别表示为：

*U* *i*  *Ui* /*i* , *U* 0  *U* 0 /**0

+

Z1

R

.

Ui

C

Z 2 R

C

-

+

.

Uo

-

+

.

Ui

C

R

-

+

.

Uo

-

+

R

.

Ui

+

-

C

.

Uo

-

* 1. (b) (c)

图 11-1 文氏电路及在低频、高频下的近似等效电路

当正弦电压*U* *i* 的频率变化时，*U* 0 的变化可从两方面来看。在频率较低的

情况下，即当时， 1  *R* 图 11-1(a)电路可近似成如图 11-1(b)所示的低频等

*C*  

效电路。**愈低， *U* 0 的幅度愈小，其相位愈超前于*U i* 。当**趋近于 0 时，*U* 0

趋近于 0，**  ** 接近+90。而当频率较高时，即当 1  *R* 时，图 11-1(a)

0 *i C*

电路可近似成如图 11-1(c)所示的高频等效电路。**愈高，*U* 0 幅度也愈小，其

相位愈滞后于*U* *i* 。当**趋近于 时， *U* 0 趋近于 0，**0  *i* 接近-90。由此可

见，当频率为某一中间值 *f* 0 时，*U* 0 不为零，且*U* 0 与*U* *i* 同相。

我们把输出电压和输入电压的比称为网络函数，记作 *H* ( *j*)  *H* ( *j*) /**。

其中 *H* ( *j*)  *U*0 ,**** **

。*H* ( *j*) 和**分别为电路的幅频特性和相频特性，它

0 *i*

*U*

*i*

们的曲线见图 11-2。当频率 *f*  *f* 0  1 / 2*RC* 时， *H* ( *j*) 有极大值，** 0 ，经过

计算， *H* ( *j*) 的最大值为 1/3。因此，这种电路具有选择频率的特点。它被广

泛地用于 *RC* 振荡器的选频网络。

H(jw)

1

1 3

ω

1. ω 0

o

+90

**

1

ω ω 0

0

-90o

图 11-2 文氏电路的幅频特性和相频特性

1. 文氏电路 *f* 0 的测定

前面提到，当文氏电路的电源频率 *f*  *f* 0  1 / 2*RC* 时，其输入电压和输出电压之间的相位差为零，即** 0 ，因此 *f* 0 的测定就转化为输入电压和输出电压相位差的测定。

用示波器观察李萨育图形的方法定 *f* 0

我们知道，如果在示波器的垂直和水平偏转板上分别加上频率、振幅和相位相同的正弦电压，则在示波器的荧光屏上将得到一条与 *X* 轴成 45的直线。实验线路如图 11-3 所示，给定*Ui* 为某一数值，改变电源频率，并逐渐改

变 *X、Y* 轴增益，使荧光屏上出现一条直线，此时的电源频率即为 *f* 0 。

+

R

示波器

.

Ui

C

R

C

-

X

Y

图 11-3 用示波器观察李萨育图形

1. 双 T 网络频率特性

图 11-4 所示双 T 网络的频率特性正好与 RC 串并联电路相反。在

f0 

1 时,

2RC

  0 , 输出电压为零, 因此可用来滤去频率为 f0 的谐波。f0 也

称为该网络的“截止频率”。双 T 电路的幅频特性曲线见图 11-5。

R R

β

1 3

C

C

2C R/2

. .

Usr

2

图 11-4

Usc

4 0

f

f 0

图 11-5

1. 利用文氏电路组成正弦波振荡器

*RC* 正弦波振荡器一般由选频网络、反馈网络和放大器组成。图 11-6 是由文氏电路和运算放大器构成的正弦波振荡器示意图。

到示波器

R

C

R

C

+ +

. .

U0 放大器 Ub

- -

*U* *b*  *KU* 0 （K 为正实数） 图 11-6

*A* *F*

在电路满足相位平衡条件(反馈信号与输入信号同相)，幅度平衡条件

 1(其中 *A* 为放大器的放大倍数， *F* 为反馈网络的反馈系数)，而放大器的

工作点又正常的情况下，即能产生正弦波振荡。

正弦波振荡器的起振是依靠电路中的选频网络，从电路元件中的噪声电压或电源接通瞬时的过渡过程中选出符合相位平衡条件的振荡频率，在满足起振

条件 *A* *F*

* 1 的情况下，振荡幅度由小到大而建立起来的。振荡建立起来以后，

在 *RC* 串并联选频网络振荡电路中，用负反馈电路来实现稳幅。即 *A* *F*

由大于

1 变成等于 1，使振荡稳定下来。通过理论计算，*RC* 串并联网络振荡电路中放大器的放大倍数为 *A*  3 。

三、预习要求

1. 根据给定参数 *C*=22n 和 *R*=10k，计算文氏电路的 *f* 0 及此频率时的

*H* ( *j*) 及**。

1. 根据给定参数 *C*=22n 和 *R*=10k，计算双 T 网络的 *f* 0 及此频率时的

*H* ( *j*) 及**。

四、实验设备

信号发生器 一台

交流毫伏表 一只

数字频率计 一只

双踪示波器 一台**五、实验任务与步骤**

1. 用示波器观察李萨育图形的方法测定文氏电路的 *f* 0 。用频率计测 *f* 0 ， 并用交流毫伏表测 *f* 0 时的*Ui* 、*U* 0 。
2. 测文氏电路的幅频特性 *H* ( *j*) 及相频特性**。建议测 10~15 个点，频率由 0.1 *f* 0 到 10 *f* 0 。
3. 利用文氏桥组成图 11-6 所示的正弦波振荡器。放大器的放大倍数 *K* 可以稍加调节。调节放大倍数 *K*，使示波器上出现正弦波形。用频率计测量此正弦波的频率。用交流毫伏表测量放大器输入、输出电压。
4. 测双 T 网络的幅频特性 *H* ( *j*) 及相频特性**。建议测 10~15 个点，频率由 0.1 *f* 0 到 10 *f* 0 。

六、实验报告要求

1. 用半对数坐标纸画 *H* ( *j*) ~ ** 及**~ ** 曲线。

**0 **0

1. 说明由文氏桥组成的正弦波振荡器中，振荡频率与电路参数的关系。

# 实验十二 有源滤波器

一、实验目的

1. 了解运算放大器的一个用途——组成有源滤波器;
2. 对比有源、无源滤波器的滤波特性，并初步分析两种特性的不同。**二、实验说明**

通常滤波器大多是一个二端口网络。在某一段频率范围内，输入电压 Ui

可以通过这个网络, 在输出电压 U0 中显现出来, 对于一个理想的滤波器来讲,

在这一段频率内,

U 0  Ui ; 在其它频率下, 输入电压被网络衰减; 输出电压

U0 很小, 在理想情况下,

**.**

U 0  0 。

R



C

## .

u i u0

图 12-1

(1) 图 12-1 的线路是一低通滤波器, 它的幅频特性是:

h    1

U 0

U i

1

1  jRC

1  (f / f )2

0

(1)

其中

f0 

1

2RC

由于 f 的变化范围很大, 作图不方便, 工程上常取它的对数来研究。例如当 f 变化 1000 倍时, lgf 的变化仅为 3。按工程习惯, 令

H=201gh

H 的单位叫做分贝, 写作 db。H 的 db 值与 h 的关系如下表:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| h | 1 | 1  2 | 1  10 | 1  100 | 1  1000 |
| H(db) | 0 | -6 | -20 | -40 | -60 |
|  | U 0  Ui | U  1 U  0 2 i | U  1 U  0 10 i | U  1 U  0 100 i | U  1 U  0 1000 i |

低通滤波器的对数幅频特性是

H  20 lg h  20 lg

1

1  ( f )2

f 0

(2)

在半对数坐标纸上, 用 H 作纵座标, 用 f/f0 作横座标, 画出式(2)的图形如图 12-2。由曲线可见这个滤波器只允许较低频率的电压通过, 是一个最简单的低通滤波器。

### R R



▲

0

**-** 20

**-** 40

A

0.01 0.1 1 10 100

f f 0

B



u i

**.**

C1

C2 u0

**.**

▲

图 12-2 图 12-3

这个图形有一个近似的画法: 作水平线 A, 到 f=f0(即 f/f0=1)时, 作直线 B, 它的斜率为-20db/十倍频(即 f 每增加 10 倍时, B 线的下降为 20db)。这样作图的理由, 可从式(2)看出:

1. 当 f<f0 时, H  20 lg1  0 , 即水平线。
2. 当 f>f0 时,

H  20 lg 1

 20 lg x (其中x  f / f0

), 由此可作出直

线 B, 它的斜率为-20/十倍频, 而且通过 H=0、 f

(f / f )2

0

f0

 1的一点。

1. 直线B 与横轴相交点的频率是f0, 它是折线拐角处的频率, 所以f0 称为拐角频率。

2. 为了改善滤波特性, 可用二节 R-C 网络构成图 12-3 线路。这次实验选用二个相同的 R, 以便于计算。

这个电路的幅频特性是

h  (3)

1

1  jRC  j2RC  j22R 2C C

1

2

1 2

经过推导,

h 

1

(1  jRC)(1  jRC**** )

其中

C 

C  2C  C2  4C2

1

2

1

2

2

C**** 

C  2C  C2  4C2

1

2

1

2

2

令

f  

则

h 

1

2RC ,

f **** 

1

2RC**** ,

f   f ****



对数幅频特性为:

1

(1  j f )(1  j f )

f 

f ****



1  

 f 2   f 2 



 f     f ****  

 1    

H  20 lg h  20 lg

 20 lg

1   

 f 2

 f  

 H1  H 2

* 20 lg

(4)

1   

 f 2

 f **** 

用前面的折线分析方法, 很容易画出式(4)的特性。先分别近似画出代表

H1、H2 的两组折线, 再将它们相加, 即得到近似代表 H 的三段折线, 其中f 、

f **** 为拐角频率(图 12-4), 实际特性也画在图中。

H 1

0

▲

f'

f

斜率为

**\_** 20db

十倍频

▲

H2 ▲ 0

f'

f''

f

斜率为

▲

**\_** 20db

十倍频

H ▲ f '

0

f''

斜率为

▲

**\_** 20db

f

十倍频

斜率为

**\_** 40db

十倍频

图 12-4

这个滤波器的特性在高频部分显然有所改善, 因为特性的斜率为-40db/十倍频, 即频率每增加十倍时, 衰减不是 20db, 而是 40db 了。

1. 为了获得更好的滤波效果, 可在线路中加入有源器件, 形成有源滤波器

(图 12-5)

R R



R

R

**+** 1

C1

C 2



ui

**.**

C1

▲ **+ .**

E **=** u0

**.**

C 2

**-**

## . u. .

ui 0 u0

图 12-5 图 12-6



R

C1

R

u**.** i

**-**

**+**

C2

u0

**.**

图 12-7

这个线路可等效为图12-6, 即相当于在C1 支路中串联一个电压源, 电动势的大小等于 U0。例如当 Ui=1V 时, 如果不串入 E, 设 U0=0.9V(低频时), 由于串入 E=0.9V 电源, U0 显然会增高一些, 这样便改善了低频下的特性。

在高频下, 当Ui=1V 时, 如不串入E, 设U0=0.005V, 串入E=0.005V 后, 由于 E<<Ui, E 经过 RC2 那一级的衰减, 不会对输出电压产生显著的影响。这样可以定性地看出, 采用这种线路会改善低频特性。

图 12-5 中放大倍数为+1 的放大器可采用运算放大器, 联接如图 12-7。这个电路的幅频特性为:

1

1  2R 2C C  j2RC

1 2

2

h  (5)

令

1

2R C1C

f1  ,

f 2 

1

4RC 2

则

h  1



2

1  

 f 2   f 2



 f1    f 2 

 

  

对数幅频特性为:



1      

 f 2 

2

 f 2



 f1    f 2 



H  20 lg h  20 lg

(6)

由(6)式, 可作出近似代表 H 的折线:

1. 当 f<f1 时, 且f1  f 2 时,
2. 当 f>f1 时, 且f1  f 2 时,

H  20 lg1  0 , 可作水平线 A(见图 12-8);

f

 f 4

 

 f 2

 f1   f 2 

 



 f 4

 

 f1 

H  20 lg

 20 lg

 40 lg

f1

由此可作出直线B, 它的斜率为-40/十倍率, 且通过 H=0、f/f1=1 的一点(见图 12-8)。

f f 1

▲

A

**1**

c2 **=** 8

c1

0

c1

c

c

1

2 **=** 2

c2 **=** 6

c

c

1

c

c

1

2

**=**

4

2

**=**1

B

▲

斜率为-40db/十倍频图 12-8

在拐角频率 f1 的左右, 可以把 f1 代入(6)式作一般观察, 此时

H f 1

 10 lg 4 C2

C

1

出口电压的大小决定于 C1/C2 的值。当 C1/C2>4 时,

H f 1  0 , 即幅频特性

可以有一个局部的隆起, 见图 12-8 适当选择C1 与C2 的比值, 即可得到相当逼近于折线的滤波特性。

本次实验中, 我们选 C1/C2=2。当 f=f1 时, 有源滤波器的 H 值为

H f 1

 10 lg 4 C2

C

 10 lg 2  3db

1

如不采用有源滤波器, 把  1 

1

R C1C2

代入(3)式, 滤波器的 H 值为



H f 1  20 lg







 2   20 lg 2.8  9db

C1

C2

C2

C1





后者衰减更多, 所以前者的滤波性能比后者显著改善。这一点在实验结果里是可以明显看到的。

1. 用运算放大器组成的有源高通滤波器, 如图 12-9 所示。

R1



C

C

**-**

**+**

R2

图 12-9

这个电路的幅频特性为:

h  (7)

1

1 

1

2

2R R C2

* j

1 2

R C

2

令

f  , f  1

1

2C R1R 2

1 2 R C

2

则

h  1



1   1     2 

 f 2 

2

 f

2



 f    f 

对数幅频特性为:

H  20 lg h  20 lg (8)



1   1  

 f 2 

2

 f

2



 f    f 

  2 

由(8)式, 可作出近似代表 H 的折线:

* 1. 当 f>f1 时, 且f1  f 2 时,
  2. 当 f<f1 时, 且f1  f 2 时,

H  20 lg1  0 , 可作水平线 A;

H  20 lg

 40 lgf1

f

 f 2

 1 

 f 

 40 lg f

f1

由此可作出直线 B, 它是一条斜率为 40/十倍频的直线, 而且通过 H=0、

f  1 的一点。H 的折线特性见图 12-10, 可见 f1 为拐角频率, 图上还画出了

f1

R2=4R1 时的实际特性。由图可见, 采用运算放大器后, 可使滤波器的实际特性十分逼近理想特性。

H (db) H (db)

▲

▲

0.01 0.1

1

A

0

0

B

▲

0.1

10 100

▲

f

f 1

-20

-4 -40

-80

-8

* 1. 1 f

f 1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 图 12-10 |  | 图 12-11 |
| **三、仪器设备** |  |  |
| 功率信号发生器 | 一台 |  |
| 交流毫伏表  电路分析实验箱 | 一个  一台 |  |
| **四、预习任务** |  |  |

* + 1. 已知图 12-3 无源低通滤波器电路的参数是: R=10K , C1=0.15 f, C2=0.075f, 计算拐角频率f  及f **** ; 并在半对数座标纸上, 以 f/f1 为横座标, H 为纵座标(见图 12-11)画出此滤波器的折线特性。画图时, 取 f1=150Hz, 以便于与有源低通滤波器的特性相比较。以后该滤波器的实验结果也画在这张图上。
    2. 已知图12-7 有源低通滤波器电路的参数同上, 计算拐角频率f1, 并画出此滤波器的折线特性(座标的取法与前相同)。
    3. 已知图 12-9 有源高通滤波器电路的参数是: C=0.2 f, R1=2.5K  , R2=10K, 计算拐角频率 f1, 并画出折线特性(坐标的取法与前相同)。
    4. 拟出测量以上三个电路的对数幅频特性的记录表格。给定 f/f1=0.02, 0.05,

0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0。

五、实验任务

1. 分别测量图 12-3, 12-7 电路的对数幅频特性, 各电路的参数见预习任务。
2. (选作)测量图 12-9 电路的对数幅频特性，电路的参数见预习任务。

六、实验报告要求

1. 在半对数座标纸上分别画出图 12-3, 12-7, 12-9 电路的对数幅频特性(与各自的折线特性画在同一张图上)。
2. 比较有源、无源低通滤波器的特性，说明有源滤波器的滤波效果较好。
3. 定性分析图 12-9 电路, 说明它是个高通滤波器。

# 实验十三 交流电路中的互感

一、实验目的

1. 用实验方法测定两个感应耦合线圈的同名端，互感系数和耦合系数。
2. 研究两个感应耦合线圈正向串联和反向串联时互感的作用。

二、实验说明

1. 同名端

图 13-1(a)示出两个有磁耦合的线圈，设电流*i*1 从 1 号线圈的 a 端流入，电流*i*2 从 2 号线圈的c 端流入。由*i*1 产生而交链于 2 号线圈的互感磁通链为**21 , *i*2 的自感磁链为**22 ，当**21 与**22 方向一致时，互感系数(互感) *M* 21 为正，则称 1 号线圈的 a 端与 2 号线圈的 c 端为同名端。(显然 b、d 也是同名端)；若**21 与

**22 方向相反如图 13-1(b)所示，则 a、c 端称为异名端(即 a、d 或 b、c 为同名端)，同名端常用符号“·”或“\*”表示。

a c



i1

**.**

ψ11

i2

**.**

1

2

ψ 21 22

ψ



ψ11

c a

i1

**.**

ψ 22 i2

▲

1

2

d b **.**

d

ψ 21

▲

▲

▲

▲

▲

▲

b

( a )

▲

图 13-1

( b )

同名端取决于两个线圈各自的实际绕向以及它们之间的相对位置。

在实际中，对于具有耦合关系的线圈，若其绕向和相互位置无法判别时， 可以根据同名端的定义，用实验方法加以确定。下面介绍几种常用的判别方法：

1. 直流通断法

如图 13-2 所示，把线圈 1 接到直流电源，把一个指针式万用表(使用微安

档)接在线圈 2 的两端。在电路接通瞬间，线圈 2 的两端将产生一个互感电动势，电表的指针就会偏转。若指针正向摆动，则与直流电源正极相联的端钮 a

与万用表正极相联的端钮 c 为同名端；若指针反向摆动，则 a、c 为异名端。



a

+

E

\_

1

b

M

+

\_

d



c

2 μA

图 13-2

1. 等效电感法

设两个耦合线圈的自感分为 *L*1 和 *L*2 ，它们之间的互感为 *M* 。若将两个线圈的异名端相连如图 13-3(a)所示，称为正向串联，其等效电感为：

*L* 正  *L*1  *L*2  2*M*

M

.

▲

L 1

.

L 2

. I

+

. U

\_

M

L 1

.

. ▲ I

.

L 2

+

. U

\_

(a)

图 13-3

若将两个线圈的同名端相连如图 13-3(b)所示，则称为反向串联，其等效电感为：

*L* 反  *L*1  *L*2  2*M*

显然等效电抗*L*正  *L*反.

利用这种关系，在两个线圈串联方式不同时，加上相同的正弦电压，则正向串联时电流小，反向串联时电流大。同样地，若流过相同的电流，则正向串联时端口电压高，反向串联时端口电压低。据此即可判断出两线圈的同名端。

1. 互感 *M* 有多种测量方法，如：
2. 等效电感法

用数字电感表，分别测出两个耦合线圈正向串联和反向串联时的等效电感，则互感：

*M*  *L* 正  *L* 反

4

用这种方法测得的互感一般来说准确度不高，特别是当 *L* 正和 *L* 反的数值比较接近时，误差更大。

1. 互感电势法

在图 13-4(a)所示电路中，若电压表内阻无穷大，则有

*U* 2  *E*2  *M* 21 *I*1



a

**+**

**.**

U1

**\_**

b

M

c

A

V

**~~.~~**

I 2

**+**

**.**

U2

**\_**

d



a

M

c

**+**

**.**

U1

**\_**

I

A

**.**

**+**

1

**.**

U

2

V

b

**\_**

d

▲

▲

所以互感

( a )

图 13-4

( b )

*M* 21

 *U* 2

*I*

同理，在图 13-4(b)所示电路中有

*M* 12

1

 *U*1

*I*

可以证明

2

*M* 12  *M* 21 ，统一用 *M* 表示。

互感 *M* 测得以后，耦合系数可由下式计算：

*K*  *M*

*L*1 *L*2

三、仪器设备

1. 电路分析实验箱 一台
2. 功率信号发生器 一台
3. 数字电感表 一只
4. 指针式万用表 一只
5. 数字万用表 一只
6. 交流毫伏表 一只

四、实验内容及步骤

1. 用直流通断法测定耦合线圈的同名端，接线图如图 13-2 所示，直流电源电压 *E*=1.5V。
2. 用等效电感法测定耦合线圈的同名端，接线图如图 13-3 所示，用数字电感表分别测量出两个耦合线圈正向串联和反向串联时的等效电感 *L* 正和 *L* 反， 即可判断出两线圈的同名端。
3. 用步骤 2 测量出的等效电感 *L* 正和 *L* 反值，代入下式：

*M*  *L* 正  *L* 反

4

得出互感 *M* 的值。

1. 用互感电势法测定两个耦合线圈的互感*M* 12 和*M* 21 ，并验证*M* 12  *M* 21 ， 用功率信号发生器作为交流电源(注意：功率信号发生器的输出应先调到最小， 然后逐渐加大)，接线图如图 13-4 所示。测量电路的 *I*1、*I*2、*U*1、*U*2 值，再

用公式 *M*

 *U* 2 与*M*

 *U*1

分别计算出*M* 和*M* 。

21 *I*

1

12 *I*

2

21 12

① 将功率信号发生器设为 50Hz

② 使用实验箱内互感电路部分的交流电源，也可测出互感 *M* 12 和 *M* 21 ，实验时要在电路中串上限流电阻 *R*，限流电阻 *R* 可借用其它电路部分的可调电位器。

五、思考题

除了在实验原理中介绍的测定同名端的方法外，还有没有其他方法？

六、实验报告要求

1. 根据实验步骤 3 所得数据计算耦合线圈的互感 *M* 和耦合系数 *K*。
2. 将上述计算所得互感 *M* 与步骤 4 测得的互感 *M* 相比较，并进行分析。回答思考题。

# 实验十四 二端口网络的研究

一、实验目的

1. 学习测定无源线性二端口网络的参数。
2. 了解二端口网络特性及等值电路。**二、实验说明**
3. 对于无源线性二端口（图 14-1）可以用网络参数来表征它的特征，这

些参数只决定于二端口网络内部的元件和结构，而与输入（激励）无关。网络参数确定后，两个端口处的电压、电流关系即网络的特征方程就唯一的确定了。

1

输入端



1



*I*

*U*1

无源线性 二端口网络



2

*I*

*U* 2

2

输出端

1′ 2′

图 14-1

1. 若将二端口网络的输出电压*U* 2 和电流－*I*

2

作为自变量，输入端电压

*U*1 和电流 *I*1 作因变量，则有方程

*U*1  *A*11*U* 2  *A*12 ( *I* )

2

*I*  *A U*  *A* ( *I* )

1 21 2 22 2

式中 *A*11 、 *A*12 、 *A*21 、 *A*22 称为传输参数，分别表示为

*A*  *U*1

*I*

*U*

2

11 

2

  0

*A*11

是输出端开路时两个电压的比值，是一个无量纲的量。

*A*21

*A*12



 1

*I*

*U* 2



*U*1

 *I*2

2  0

*U* 2  0

*I*



*A*21

*A*12

是输出端开路时开路转移导纳。

是输出端短路时短路转移阻抗。

*I* *A*22  1

* *I*

2

*U* 2  0

*A*22

是输出端短路时两个电流的比值，是一个无量纲的量。

可见，A 参数可以用实验的方法求得。当二端口网络为互易网络时，有

*A*11 *A*22  *A*12 *A*21  1

因此，四个参数中只有三个是独立的。如果是对称的二端口网络，则有

*A*11  *A*22

1. 无源二端口网络的外特性可以用三个阻抗（或导纳）元件组成的 T 型或π型等效电路来代替，其 T 型等效电路如图 14-2 所示。若已知网络的 A 参

数，则阻抗 *r*1 、*r*2 、*r*3

r3

分别为：

*r*1 

*A*11 1

*A*21

1 r1 r2 2

*A* 1

*r*2  22

*A*21

1' 2'

*r*3 

1

*A*21

图 14-2

因此，求出二端口网络的 A 参数之后，网络的 T 型（或π）等效电路的参数也就可以求得。

1. 由二端口网络的基本方程可以看出，如果在输出端 1-1′接电源，而

、*I*

1

输出端 2-2′处于开路和短路两种状态时，分别测出*U*10

*I*

、*U* 20

 0 、*U*1*S*

 *S* 、2 *S*

*I*

1

则就可以得出上述四个参数。但这种方法实验测试时需要在网络两

端，即输入端和输出端同时进行测量电压和电流，这在某种实际情况下是不方便的。

在一般情况下，我们常用在二端口网络的输入端及输出端分别进行测量的

方法来测定这四个参数，把二端口网络的 1-1′端接电源，在 2-2′端开路与短路的情况下，分别得到开路阻抗和短路阻抗。

*U*10



*R*

01 

*I*

*I*

2

10

  0

 *A*11 ,

*A*21

*RS*1

*U*1*S*



*I*



1*S*

*U* 2

 0 

*A*12 *A*22

再将电源接至 2-2′端，在 1-1′端开路和短路的情况下，又可得到：

*R*02 

*I*  0

*U* 20

20

*I*

1

 *A*22 ,

*A*21

*RS* 2

*U* 2 *S*



*I*



2 *S*

*U*1  0

 *A*12

*A*11

同时由上四式可见：

*R*01 

*R*02

*RS*1 *RS* 2

 *A*11 *A*22

因此，*R*01

、*R*02

、*RS*1

、*RS* 2

中只有三个独立变量，如果是对称二端口

网络就只有二个独立变量，此时

*R*01  *R*02 , *RS*1  *RS* 2

如果由实验已经求得开路和短路阻抗则可很方便地算出二端口网络的 A

参数。

三、仪器设备

1. 电路分析实验箱 一台
2. 数字万用表 一只**四、实验任务**
3. 如图 16-3 接线

1 R1 R2 2

R3

R4

R5

1' 2'

图 16-3

*R*1  100

，*R*2  *R*5  300

，*R*3  *R*4  200

， *U*1 

10 V 。 将端口

2-2′处开路测量*U* 20

、*I*

1*S*

、*I*

10

2 *S*

14-1 中。

 ，将 2-2′短路处测量*I*

 ，并将结果填入表

表 14-1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 2-2′开路 | *U* 20 | *I*  10 |
| *I*  0  2 |  |  |
| 2-2′短路 | *I*  1*S* | *I*  2 *S* |
| *U* 2  0 |  |  |

1. 计算出

*A*11 、 *A*12

、*A*21

、*A*22 。

*A*  *U*10



*A*  10

*I*

*U*

11 

*I*

*I*

*U*

20

2

2

  0,

21 

20

  0

*A*12 

*U*1*S*



* *I*

2 *S*

*U* 2

 0,

*A*22



1*S*

*I*





* *I*

2 *S*

*U* 2  0

验证：

*A*11 *A*22  *A*12 *A*21  1

1. 计算 T 型等值电路中的电阻 *r*1

、*r*2

、*r*3

，并组成 T 型等值电路。

1 r1 r2 2

r3

1' 2'

在 1-1′处加入果填入表 14-2 中。

图 16-4

*U*1  10 V ，分别将端口 2-2′处开路和短路测量并将结表 14-2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 2-2′开路 | *U* 20 | *I*  10 |
| *I*  0  2 |  |  |
| 2-2′短路 | *I*  1*S* | *I*  2 *S* |
| *U* 2  0 |  |  |

*r*1 

*A*11 1

*A*21

*r*2 

*A*22 1

*A*21

*r*3 

1

*A*21

比较二表中的数据，验证电路的等效性。

# 实验十五 负阻抗变换器

一、实验目的

1. 加深对负阻抗概念的认识，掌握对含有负阻电路的分析研究方法。
2. 了解负阻抗变换器的组成原理及其应用。
3. 掌握负阻抗变换器的各种测试方法。**二、实验说明**
4. 负阻抗是电路理论中的一个重要基本概念，在工程实践中也有广泛的应用。负阻的产生除了某些非线性元件在某个电压或电流的范围内具有负阻特性外，一般都由一个有源双口网络来形成一个等值的线性负阻抗。该网络由线性集成电路或晶体管等元件组成，这样的网络称作负阻抗变换器。

按有源网络输入电压和电流与输出电压和电流的关系，可分为电流倒置型和电压倒置型两种（INIC 及 VNIC）。

1. 实验用线性运算放大器组成如图 15-1 所示的电路，在一定的电压、电流范围内可获得良好的线性度。
2. 图中虚线框所示电路是一个用运算放大器组成的电流倒置型负阻抗变换器（INIC）。设运算放大器是理想的，由于它的正输入端（“+”）与负输入端（“—”）之间为虚短路，输入阻抗为无限大，故有

. .

*UP*  *Ua*

即

*U* 0

R

R

*I*1

*I*3

*I*4

*I*2

*U* *p U* *a*

*U*1

*U* 2

Zin

. .

*U* 1  *U* 2

运算放大器输出端电压

. . . . .

*U* 0  *U* 1 *I* 3 *R*  *U* 2 *I* 4 *R*

ZL

∴

. .

*I* 3  *I* 4

. . . .

又 ∵ *I* 1  *I* 3

*I* 2  *I* 4

图 15-1

∴ . .

*I*1  *I*2

又由负载端电压和电流的参考方向，有

.

*U* 2

.

*I* 2  

*ZL*

即

.

*U* 2  *ZL*

.

*I* 2

因此，整个电路的激励端的输入阻抗

. .

*Zin*  *U* 1  *U* 2  *ZL*

. .

*I*1 *I* 2

可见，这个电路的输入阻抗为负载阻抗的负值，也就是说，当负载端接入任意一个无源阻抗元件时，在激励端就等效为一个负的阻抗元件，简称负阻元件。

1. 负阻抗变换器元件－Z 和普通的无源 R、L、C 元件 Z＇作串、并联联接时，等值阻抗的计算方法与无源元件的串、并联计算公式相同，

即对于串联连接，有

*Z*串  *Z*  *Z* 

对于并联连接，有

三、仪器设备

*Z*并 

* *Z*  *Z* 
* *Z*  *Z* 

1．电路分析实验箱 1 台

4．数字万用表 1 只**四、实验内容与步骤**

1. 测量负电阻的伏安特性，实验线路如图 15-2 所示。
2. 按实验线路接线，断开开关 S。
3. 测出对应的 U、I 值，计算负电阻阻值，将数据记录于表 15-1 中。
4. 画出等效阻抗的伏安特性。表 15-1 RL=2KΩ

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U（V） | | -7 | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1.5 | 0 | 1.5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| I（mA） | |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 等效阻抗  （Ω） | 测量值 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 理论值 |  | | | | | | | | | | | | | | |

RL



I

1K R

A

S

R

1K

V

R1

U

图 15-2

1. 负阻抗元件与普通无源元件的并联连接
2. 按实验线路接线，闭合开关 S。
3. 测出对应的 U、I 值，并计算并联后的总阻抗，将数据记录于表 15-2。
4. 验证负阻元件－Z 和普通的无源 R、L、C 元件 Z＇作串、并联连接时，等值阻抗的计算方法与无源元件的串、并联计算公式相同，。

表 15-2 RL=400Ω

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| R1 | | ∞ | 5k | 1k | 700Ω | 400Ω | 200Ω | 100Ω |
| U（V） | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| I（mA) | |  |  |  |  |  |  |  |
| 等效 阻抗（Ω） | 测量值 |  |  |  |  |  |  |  |
| 理论值 |  |  |  |  |  |  |  |

五、注意事项

整个实验中激励电源不得超过实验给定值。

# 实验十六 回转器

一、实验目的

1. 掌握回转器的基本特性。
2. 测量回转器的基本参数。
3. 了解回转器的应用。**二、实验原理**
4. 回转器是一种有源非互易的新型二端口网络元件，电路符号及其等值

电路如图 16-1（a）、（b）所示。

1 I 1

I 2 2

I 1 I 2

1 2

U 1 U 2 U 1 U2

1' 2'

图 16-1（a）

1' 2'

图 16-1（b）

理想回转器的导纳方程如下：

 *I*1   0

 *G**U* 1

*I* 2

 *G*

0 *U* 2

或写成

  

 

*I*1  *GU* 2 *I* 2  *GU* 1

也可写成电阻方程：

*U* 1   0

 *R* *I*1

*U* 2

 *R*

0 *I* 2

或写成

  

 

*U* 1  *RI* 2 *U* 2  *RI* 1

式中 G 和 R 分别称为回转电导和回转电阻，简称为回转常数。

1. 若在 2—2＇端接一负载电容 C，则从 1—1＇端看进去就相当于一个电

感，即回转器能把一个电容元件“回转”成一个电感元件，所以也称为阻抗逆变器。2—2＇端接有 C 后，从 1—1＇端看进去的导纳 Yi 为

*Yi*  *I*1 

*U* 1

又∵

*GU* 2

  *G*2*U* 2

*I* 2

* *I* 2 *G*

∴

*Yi* 

2

*G* 

*jC*

1

*jL*

*L*  *C*

*G*

2

1. 由于回转器有阻抗逆变作用，在集成电路中得到重要的应用。因为在集成电路制造中，制造一个电容元件比制造电感元件容易得多，我们可以用一个带有电容负载的回转器来获得数值较大的电感。

有关回转器的结构与电路原理见图 16-2

1 2

100

100 300

100

2K

2K

1K

1K

1' 2'

三、仪器设备

图 16-2

1. 电路分析实验箱 1 台
2. 双踪示波器 1 台
3. 交流毫伏表 1 台

四、实验内容与步骤

1. 在图 16-3 的 2—2＇端接纯电阻负载，信号源频率固定在 1KHZ，信号

电压 2V。用交流毫伏表测量不同负载电阻 RL 时 U1、U2 和 URL、URS ，并计算相应的电流 I1、I2 和回转常数 G，将数据记录表 16-1 内。

. .

I1 1

低

2 I2

*I*2

 *U* 2

*RL*

频 .

信 U1

号

源 RS

1K 1'

. RL

2

U

2'

表 16-1

*I*1

 *U RS*

*RS*

图 16-3

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| R  （Ω） | 测 量 值 | | 计 算 值 | | | | |
| U1（V） | U2（V） | I1(mA) | I2(mA) | G＇  =I1/U2 | G″  =I2/U1 | G 平均= G′+G″/2 |
| 500 |  |  |  |  |  |  |  |
| 1K |  |  |  |  |  |  |  |
| 1.5K |  |  |  |  |  |  |  |
| 2K |  |  |  |  |  |  |  |
| 3K |  |  |  |  |  |  |  |
| 4K |  |  |  |  |  |  |  |
| 5K |  |  |  |  |  |  |  |

1. 用双踪示波器观察回转器输入电压和输入电流之间的相位关系，按图

16-4 接线。

### 0.1uF

1

2

低频信

号源

U1

..

U2

RS

50 1' 2'

图 16-4

（1）2—2＇端接电容负载，C=0.1μF 观察 I1 与 U1 之间的相位关系，图中的 Rs 为电流取样电阻，因为电阻两端的电压波形与通过电阻的电流波形同相，所以用示波器观察 URS 上的电压波形就反映了电流 I1 的相位。

（2）（选做实验）测量谐振特性

用回转器做电感，与 C=1μF 构成并联谐振电路。如图 16-5 所示

### uF

10k 1

2

1uF

RS

1K 1' 2'

低频信号源

图 16-5

低频信号源输出电压恒定 U=2V，在不同频率时用交流毫伏表测量 1—1＇ 端的电压，并找出峰值。将数值记录于表 18—2。

表 18—2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 频率  f (HZ) | 200 | 300 | 400 | 430 | 460 | 485 | 520 | 560 | 600 | 700 | 800 |
| U1(V) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

五、注意事项

回转器的正常工作条件是 U、I 的波形必须是正弦波，为避免运算放大器进入饱和状态使波形失真，所以输入电压应以不超过 2V 为宜。