

## 实验七 线性系统的频率响应分析

### 一、 实验目的

1. 掌握波特图的绘制方法及由波特图来确定系统开环传函。
2. 掌握实验方法测量系统的波特图。

### 二、 实验仪器、设备及材料

1. PC 机一台
2. 澄科 7304 一台
3. 自动控制原理课程实验套件一套
4. 面包线若干

### 三、 实验原理

#### 1. 频率特性

当输入正弦信号时，线性系统的稳态响应具有随频率（ $\omega$  由 0 变至  $\infty$ ）而变化的特性。频率响应法的基本思想是：尽管控制系统的输入信号不是正弦函数，而是其它形式的周期函数或非周期函数，但是，实际上的周期信号，都能满足狄利克雷条件，可以用富氏级数展开为各种谐波分量；而非周期信号也可以使用富氏积分表示为连续的频谱函数。因此，根据控制系统对正弦输入信号的响应，可推算出系统在任意周期信号或非周期信号作用下的运动情况。

#### 2. 系统的频率特性

系统的正弦稳态响应具有和正弦输入信号的幅值比 $|\Phi(j\omega)|$ 和相位差 $\angle\Phi(j\omega)$ 随角频率（ $\omega$  由 0 变到  $\infty$ ）变化的特性。而幅值比 $|\Phi(j\omega)|$ 和相位差 $\angle\Phi(j\omega)$ 恰好是函数 $\Phi(j\omega)$ 模和幅角。所以只要把系统的传递函数 $\Phi(s)$ ，令 $s = j\omega$ ，即可得到 $\Phi(j\omega)$ 。我们把 $\Phi(j\omega)$ 称为系统的频率特性或频率传递函数。当 $\omega$ 由 0 到  $\infty$ 变化时， $|\Phi(j\omega)|$ 随频率 $\omega$ 的变化特性称为幅频特性， $\angle\Phi(j\omega)$ 随频率 $\omega$ 的变化特性称为相频特性。幅频特性和相频特性结合在一起时称为频率特性。

#### 3. 频率特性的表达式

(1) 对数频率特性：又称波特图，它包括对数幅频和对数相频两条曲线，是频率响应法中广泛使用的一组曲线。这两组曲线连同它们的坐标组成了对数坐标图。

对数频率特性图的优点：

①它把各串联环节幅值的乘除化为加减运算，简化了开环频率特性的计算与作图。

②利用渐近直线来绘制近似的对数幅频特性曲线，而且对数相频特性曲线具有奇对称于转折频率点的性质，这些可使作图大为简化。

③通过对数的表达式，可以在一张图上既能绘制出频率特性的中、高频率特性，又能清晰地画出其低频特性。

(2) 极坐标图（或称为奈奎斯特图）

(3) 对数幅相图（或称为尼柯尔斯图）

本次实验中，采用对数频率特性图来进行频域响应的分析研究。实验中提供了两种实验测试方法：直接测量和间接测量。

#### ● 直接频率特性的测量

用来直接测量对象的输出频率特性，适用于时域响应曲线收敛的对象（如：惯性环节）。该方法在时域曲线窗口将信号源和被测系统的响应曲线显示出来，直接测量对象输出与信号源的相位差及幅值衰减情况，就可得到对象的频率特性。

#### ● 间接频率特性的测量

用来测量闭环系统的开环特性，因为有些线性系统的开环时域响应曲线发散，幅值不易测量，可将其构成闭环负反馈稳定系统后，通过测量信号源、反馈信号、误差信号的关系，从而推导出对象的开环频率特性。

4. 举例说明间接和直接频率特性测量方法的使用。

(1) 间接频率特性测量方法

① 对象为积分环节：1/0.1S

由于积分环节的开环时域响应曲线不收敛，稳态幅值无法测出，我们采用间接测量方法，将其构成闭环，根据闭环时的反馈及误差的相互关系，得出积分环节的频率特性。

② 将积分环节构成单位负反馈，模拟电路构成如图 7-1 所示。

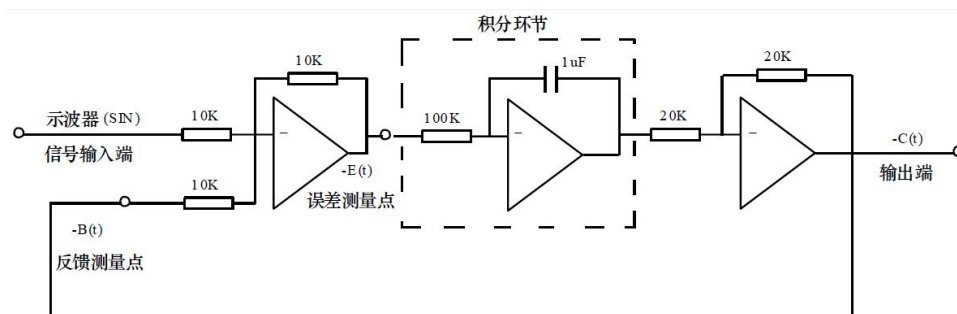


图7-1 开环为积分环节的模拟电路

#### ③ 理论依据

图 7-1 所示的开环频率特性为： $G(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{E(j\omega)} = \left| \frac{B(j\omega)}{E(j\omega)} \right| \angle \frac{B(j\omega)}{E(j\omega)}$

采用对数幅频特性和相频特性表示，则上式表示为：

$$20\lg|G(j\omega)| = 20\lg\left|\frac{B(j\omega)}{E(j\omega)}\right| = 20\lg|B(j\omega)| - 20\lg|E(j\omega)|$$

$$\angle G(j\omega) = \angle \frac{B(j\omega)}{E(j\omega)} = \angle B(j\omega) - \angle E(j\omega)$$

其中  $G(j\omega)$  为积分环节，所以只要将反馈信号、误差信号的幅值及相位按上式计算出来即可得积分环节的波特图。

④ 测量方式：

实验中采用间接方式，只须用两路表笔 AIN1 和 AIN2 来测量图 7-1 中的反馈测量点和误差测量点，通过移动游标，确定两路信号和输入信号之间的相位和幅值关系，即可间接得出积分环节的波特图。

(2) 直接频率特性测量方法

只要环节的时域响应曲线收敛就不用构成闭环系统而采用直接测量法直接测量输入、输出信号的幅值和相位关系，就可得出环节的频率特性。

① 实验对象：

选择一阶惯性环节传函为  $G(s) = \frac{1}{0.1s+1}$

② 结构框图：如图 7-2 所示。

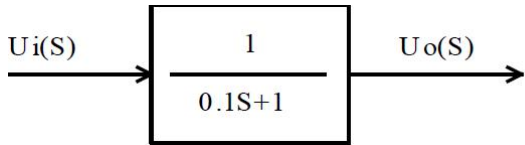


图 7-2 一阶惯性环节结构框图

③ 模拟电路图

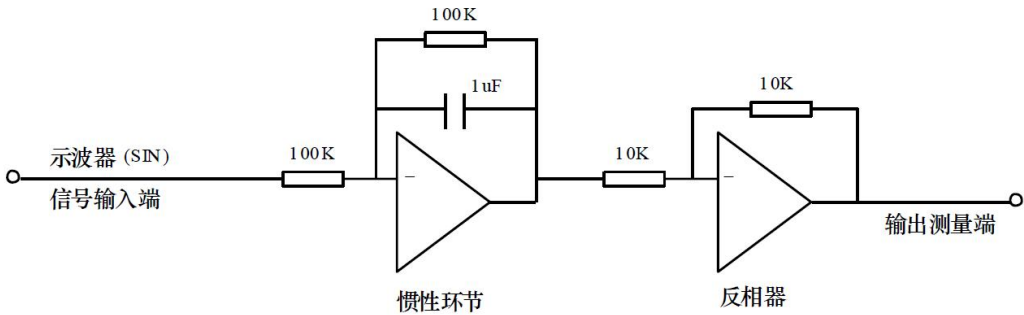


图7-3 直接测量模拟电路图

④ 测量方式

实验中选择直接测量方式，用 AIN1 路表笔测输出测量端，通过移动游标，测得输出与信号源的幅值和相位关系，直接得出一阶惯性环节的频率特性。

四、 实验内容

本次实验利用教学实验系统提供的频率特性测试虚拟仪器进行测试，画出对象波特图和极坐标图。

1. 实验对象的结构框图

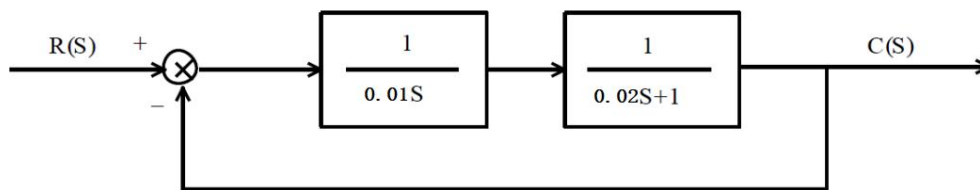


图 7-4 实验对象结构框图

## 2. 模拟电路图

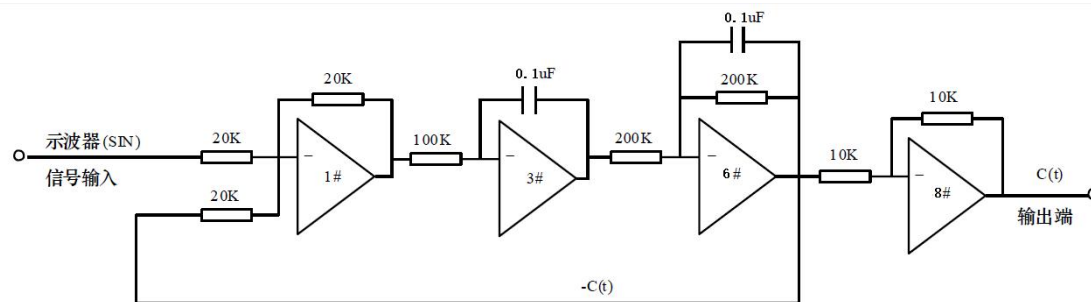


图 7-5 实验对象的模拟电路

开环传递函数为:  $G(s) = \frac{1}{0.01s(0.02s+1)}$

闭环传递函数为:  $\Phi(s) = \frac{1}{0.0002s^2+0.01s+1} = \frac{5000}{s^2+50s+5000}$

转折频率  $\omega = 70.7(\text{rad/s})$ , 阻尼比  $\zeta = 0.3536$ 。

## 五、 实验步骤

此次实验，采用直接测量方法测量对象的闭环频率特性。

### 1. 实验接线：

- 利用 1#、3#模块和 6#、8#模块搭建图 7-5 所需的电路。其中， $r(t)$  输入正弦信号，由信号发生器产生， $c(t)$  为输出信号。

### 2. 直接测量方法（测对象的闭环频率特性）

(1) 输入信号  $r(t)$  同时连接实验电路板的下方【模拟信号输入】区域的 AIN 1 接线柱，输出信号  $c(t)$  连接实验电路板的下方【模拟信号输入】区域的 AIN 2 接线柱。

(2) 打开【Electronics Pioneer—Scope】示波器软件面板，设置示波器【运行】状态为【启动】，设置启用【CH 1】和【CH2】通道。

(3) 将实验电路板【0#】区域【阶跃信号类型】拨动开关拨至【+5V】侧（即左侧）。

(4) 打开【Electronics Pioneer—FGen】函数发生器面板，设置产生不同频率（0.1Hz, 1Hz, 5Hz, 8Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz, 25Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz, 70Hz, 80Hz, 90Hz, 100Hz, 110Hz, 120Hz）的正弦信号。测量时需按下 0#模块中【按下输出阶跃信号】按键。

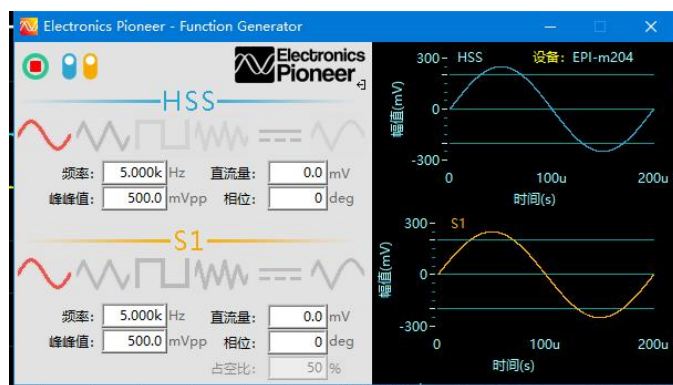


图 7-6 函数发生器面板

(5) 在示波器软面板上读出输入、输出通道的两路信号的幅值比和相位差，并记录。

频率	角频率	理论值		实测值	
		幅值比	相位差	幅值比	相位差
0.1					
1					
5					
8					
10					
15					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					
110					
120					

(6) 在半对数坐标纸上画出对应的幅频特性和相频特性，同时在极坐标图上画出频率特性。

注意：

测量过程中，可能会由于所测信号幅值衰减太大，信号很难读出，须放大，若放大的比例系数不合适，会导致测量误差较大。所以要适当地调整参考输入信号幅值。

#### 4. 实验结果验证

(1) 调整电路  $r(t)$  输入激励（方波）信号， $c(t)$  为输出信号。输入信号  $r(t)$  连接实验电路板的下方【模拟信号输入】区域的 AIN1 接线柱，输出信号  $c(t)$  连接实验电路板的下方【模拟信号输入】区域的 AIN 2 接线柱。

**注意**，此时  $r(t)$  需接【0#】区域【阶跃信号】，并接入实验电路板【信号发生器模块】S1 接线柱。此时不需要设置【Electronics Pioneer】-【FGEN】。

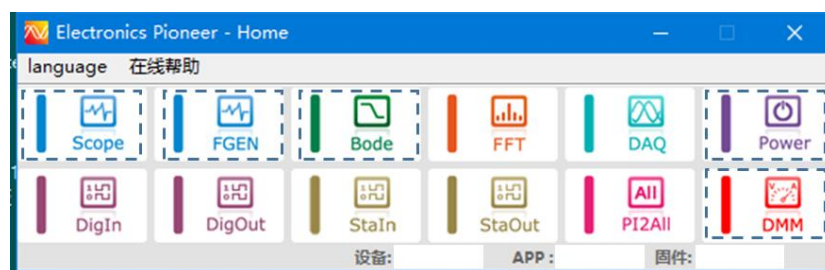
(2) 将实验电路板【0#】区域【阶跃信号类型】拨动开关拨至【+5V】侧（即左侧）。

(3) 【Electronics Pioneer】-【Power】，开启电源模块。



(4) 确认实验电路连接无误，按下实验电路板【0#】区域【电源开关】按钮。正常情况下，实验电路板右上方的+V、-V、+5V、-5V 指示灯会相应点亮。

(5) 选择【Electronics Pioneer】-【Bode】，根据系统的频率特性设置频率范围以及 10 倍频程点数。点击【开始】按钮，即可以自动测量系统频率特性。



(6) 尽管本实验使用方波作为激励信号，但由于实验电路包括电容元件，仍然需要对其进行锁零考虑，所以需要【按下输出阶跃信号】按钮。

**注意：**此时横轴 $\omega$ 采用了以 10 为底的对数坐标，纵轴则分别以分贝和度为单位。

## 六、 实验注意事项

1、按实验电路原理图连接实验线路时，请仔细连线，并反复确认连线关系是否正确。

2、【Electronics Pioneer—Power】程控电源软件面板中的某些电源设置若出现提示过载情况，可能的原因是电路连接错误造成了短路，或者电流值设置不合理（过小）。

3、【Electronics Pioneer—Power】程控电源软件面板中的+V、-V 若输出不正常，表现为+V、-V 面板指示灯不亮，请检查是否可靠连接仪器底座背板的圆形外接电源扩展接口。

4、实验电路板【0#】区域【按下输出阶跃信号】按钮是一个无锁的按下式按钮，松手后阶跃信号随即停止输出。同时，该按下时还同步释放锁零信号。

5、反相器位于 8A#区域和 8B#区域，两者功能相同，实验中使用其中一个即可。

6、部分典型环节包含电容元件，若奈奎斯特图实验效果不理想，需要考虑锁零对实验测量结果的影响问题。

7、若使用 EP204 平台，函数信号发生器在软件中设置 S1 即可。若使用 EP304 平台，函数信号发生器在软件中设置 S2 即可。注意，在实际连线中，激励信号由实验电路板左下方的函数信号发生器的 S2 接线柱提供。

8、若出现实验程序失去响应，通过 Windows 任务浏览器结束实验程序或之前未完全停止的 Electronics Pioneer 进程。

## 七、 实验报告

1. 画出被测系统的结构和模拟电路图。
2. 画出被测系统的理论开环  $L(\omega)$  曲线与  $\Phi(\omega)$  曲线。
3. 整理表中的实验数据，并算出理论值和实测值，在半对数坐标图上画出所测系统的 Bode 图，求出此时系统传递函数。

## 八、 预习要求

1. 画出被测系统的开环  $L(\omega)$  曲线与  $\Phi(\omega)$  曲线。
2. 按表中给出格式选择几个频率点，算出各点频率特性的理论值。