

《系统模型、分析与控制》

实验二 控制系统频率特性实验 实验指导书



上海交通大学机械与动力工程学院

基础实验与创新实践教学中心

2024 年

一、实验目的

1. 掌握系统或环节频率特性的测试方法，理解频率特性的物理意义；
2. 实测二阶系统的频率特性，并学习利用实测结果求取传递函数的方法。

二、实验内容

在分析和设计控制系统时，首先必须建立对象系统的数学模型，通常有二种方法来建立：

1. 解析方法。结合具体物理对象、输入量与输出量之间的内部关系，通过物理学定理列出微分方程，然后对系统进行分析研究；

2. 实验法。对已有的或选用的元件系统采用实验的方法建立数学模型，这就是广泛采用的工程方法之一——频率法，其优点是可通过图像较准确的反映被测系统或环节的动态特性，并且可用简单的频率响应实验来确定系统或元件的图像，经过对图象分析研究，求出系统或环节的传递函数。

本次实验对图 1、图 2 所示的二阶系统进行频率特性测试，对于开环系统测量其频率特性（幅频特性和相频特性），闭环系统测量其幅频特性。注意：本次实验采用的开环和闭环系统电路相似，可以在一次测量中完成开环和闭环系统测量。

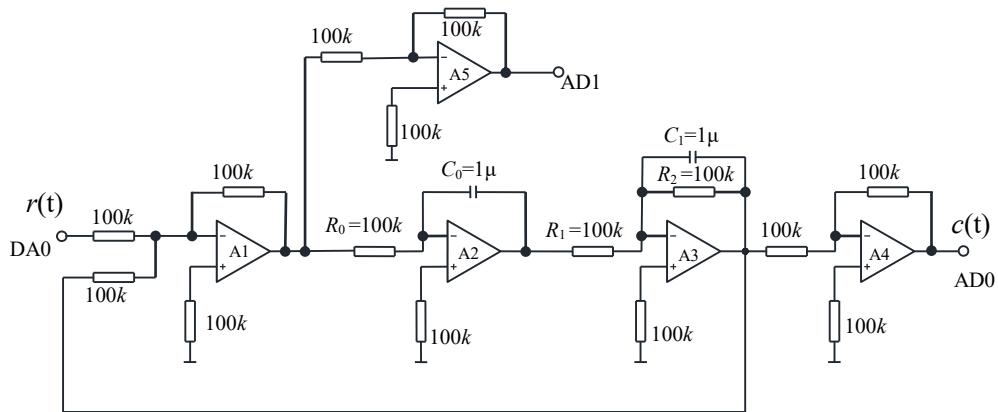


图 1 二阶系统实验电路图（开环特性需间接测量）

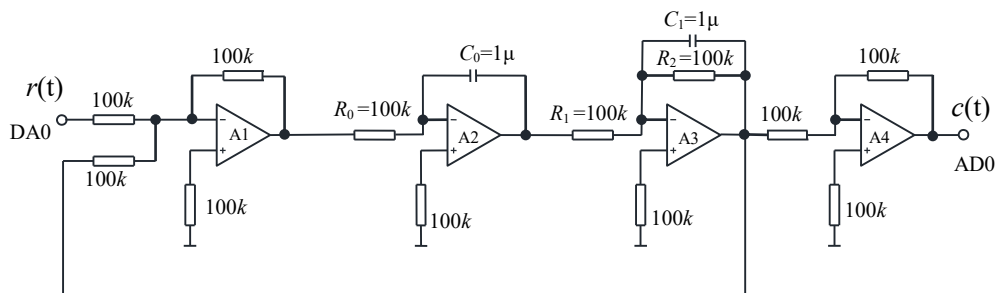


图 2 二阶闭环系统实验电路图

三、实验原理

频率特性是指系统在正弦输入信号下的稳态响应特性，系统输入量的频率由 0 变化到 ∞ 时，稳态输出量与输入量的振幅比和相位差的变化规律。其表达式为：

$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ ，式中， $A(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{|U_c(j\omega)|}{|U_r(j\omega)|}$ 为正弦输出对正弦输入的幅值比（幅频特性）， $\varphi(\omega) = \angle G(j\omega)$ 为正弦输出对正弦输入的相位差（相频特性）。

在被测系统的输入端输入一幅值为 U_r ，频率为 ω 的正弦电压 $r(t) = U_r \sin \omega t$ ，对于稳定系统，其稳定输出电压亦为一个正弦电压 $c(t) = U_c \sin(\omega t + \phi)$ 。在不同频率（ ω_1 、 $\omega_2 \dots$ ）下，测得输入电压幅值 U_{r1} 、 $U_{r2} \dots$ 和输出电压幅值 U_{c1} 、 $U_{c2} \dots$ 。经过计算可得被测系统的对数幅频特性 $L(\omega)$ 。

在不同频率（ ω_1 、 $\omega_2 \dots$ ）下，测得输入电压 $r(t)$ 和输出电压 $c(t)$ 的相位差 $\varphi(\omega_1)$ 、 $\varphi(\omega_2) \dots$ 即可得被测系统的对数相频特性 $\varphi(\omega)$ 。

对数频率特性曲线（Bode 图）：以两条曲线来表示系统的频率特性。横坐标常用对数 $\lg(\omega)$ 分度，单位为 (rad/s)；对数幅频特性纵坐标为 $L(\omega)$ ， $L(\omega) = 20 \lg |G(j\omega)|$ ，单位为 dB；对数相频特性纵坐标为 $\varphi(\omega)$ ，单位为 “°”（度）。

被测系统输入不同频率正弦电压，输出信号由双路 A/D 转换后由计算机处理和显示。幅频特性可以通过直接测量输出——输出正弦曲线的幅值得到；而相频特性可以从输出——输入正弦曲线对应位置（如图 3 所示）的偏移时间计算得到。

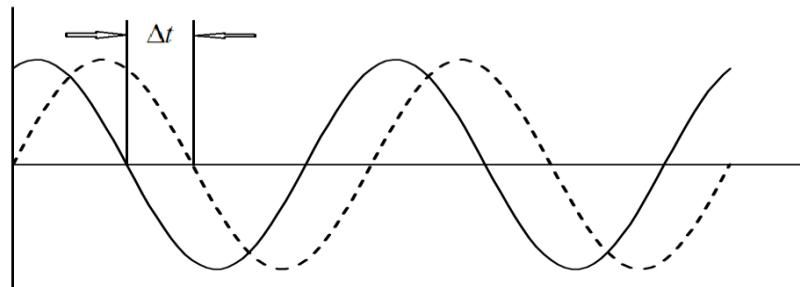


图 3 时域中相位差的测量

相位差计算公式为：

$$\varphi(\omega) = \frac{\Delta t}{T} \times 360^\circ = \Delta t \times f \times 360^\circ$$

若输出超前于输入，则 $\phi > 0$ 。

对于本次实验用二阶系统，对应的方框图如图 4 所示。

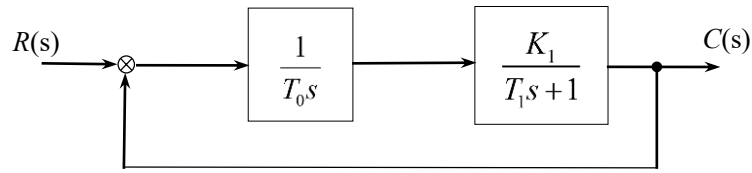


图 4 二阶系统方框图

系统开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{K_1}{T_0 s(T_1 s + 1)} = \frac{K}{s(T_1 s + 1)}$$

其中： $K = \frac{K_1}{T_0}$ ， $T_0 = R_0 C_0$ ， $T_1 = R_2 C_1$ ， $K_1 = R_2 / R_1$

闭环传递函数为：

$$\Phi(s) = \frac{K}{s(T_1 s + 1) + K} = \frac{K}{T_1 s^2 + s + K} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

其中： $T = \sqrt{T_1 / K} = \sqrt{T_0 T_1 / K_1}$ ， $\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{T_0 / (K_1 T_1)}$

四、实验步骤

1. 搭建图 1 所示的二阶系统。采用间接测量法测量系统开环特性，即在图示 AD1 处采集开环系统输入，AD0 处采集开环系统输出。

根据图 1 所示二阶系统的实际响应适当调节系统的输入正弦电压幅值（初步建议 4V）。实验过程中，若出现运放输出信号幅值过小或超出硬件幅值极限（±5V），可适当调节输入信号幅值的大小。由于数字系统 I/O 速度限制，实验系统各环节时间常数相对较大。为了确保观察到系统稳定输出信号，需开启软件中“动态显示”功能。

表 1 开环系统幅频、相频特性实验数据记录表

频率 $\omega = 2\pi f$ (rad/s)	频率 f (Hz)	输入 U_r	输出 U_c	相对幅值 U_c / U_r	偏移时间 Δt (s)	相位差 (°)
0.63	0.10					

30.21	4.81					

表 1 为二阶开环系统频率特性实验原始数据记录表，其中规定了实验测量频率范围。测量过程中根据以实验法对系统建模的需要，以理论渐近线为参考依据，自行决定其间各频率测量点。总体要求所定频率测点间隔合理，能够较为精准地求取传递函数（误差不能太大）的要求。

2. 搭建图 3 所示的二阶闭环系统，采用与步骤 1 相同的方法，完成实验数据测量并填写在表 2 中。

注意：对于闭环系统，输入信号为计算机输出到实验箱上的信号。

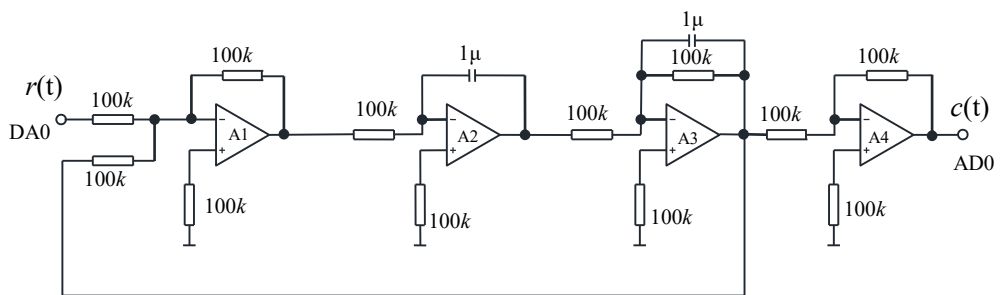


图 3 二阶闭环系统实验电路图

表 2 闭环系统幅频特性实验数据记录表

频率 $\omega = 2\pi f$ (rad/s)	频率 F(Hz)	输入 U_r	输出 U_c	相对幅值 U_c/U_r
0.63	0.10			

5. 按照图 3 电路, 以及表 2 记录的数据, 分别画出二阶闭环系统的理论和实验用 Bode 图表示的幅频特性曲线, 计算理论和实验方法各自得到的谐振峰值 M_r 和谐振频率 ω_r 。对比两者结果间的差异, 分析差异产生的原因。
6. 实验建议或意见。

提示: 实验结束后勿忘记对实验课程做出评价!