《自动控制原理》综合模拟实验装置说明书

上海交通大学自动化系实验室



实验装置由两部分组成:多功能仪器 AD2 和实验板 Lab Panel,如下图所示。

AD2 通过 USB 接口连接电脑,电脑上安装配套的虚拟仪器软件 WaveForms,可实现双 通道数字示波器 Scope、双通道任意函数发生器 Wavegen、双极性可调电源 Supplies、电压 表 Voltmeter、数据记录仪 Logger、16 通道数字逻辑分析仪 Logic、16 通道码型发生器 Patterns、 数字输入输出 StaticIO、频谱分析仪 Spectrum、网络分析仪 Network、阻抗测量仪 Impedance、 协议分析仪 Protocol 等十余种仪器功能,可充分满足实验的功能需求。



AD2 通过下图所示接口与实验板 Lab Panel 固定连接,用户不需对信号接口进行连线操作,只需使用配套的 USB 线缆将实验装置连接至电脑即可。电脑上安装好 WaveForms 软件后,即可对实验板上的信号进行测量和驱动。



实验板 Lab Panel 由电源管理电路、信号源电路、信号选择、电路切换和电路参数调节 这几个部分组成,具体如下图所示。



"信号选择"区域的 SWA 旋钮用于选择实验所用的激励信号。STEP 档位对应阶跃输入信号,其幅值由 STEP 调节档位开关 RPO 进行调节; RAMP 档位对应所设定阶跃信号的反相积分结果,为斜坡信号;ACCE 档位对应所设定阶跃信号的两次反相积分结果,为抛物线信号;WFG 档位对应 AD2 函数发生器 Wavegen 第一通道输出信号,实验时通常设定为正弦波信号。一般情况下,阶跃信号用于测量系统的动态响应,阶跃、斜坡、抛物线信号用于测量系统的稳态误差特性,正弦波信号用于测量系统的频率响应特性。通过 SWA 档位开关选定的信号 Vref 作为实验激励信号,输入到后续描述的实验电路,同时固定连接到 AD2 示波器 Scope 的第1通道 CH1。



"电路切换"区域的多个钮子开关用于切换电路的连接状态。实验板上有多个功能单元电 路模块,每个电路模块有一个钮子开关进行切换,对应的钮子开关上推则电路模块接入实验 回路,钮子开关下拉则对应的电路模块被旁路,即不接入实验回路。实验主回路的结构如下 图所示,实验时,根据实验对象的组态要求,设置各个钮子开关的位置,即可搭建对应的实 验电路。图中 SW10 用于连通系统闭环回路, SW9 用于设定闭环反馈信号的极性,分别位 于"参数调节"区域的左右两侧。SW10 下拉对应开环系统,SW10 上推对应闭环系统;SW9 下拉时反馈信号为 TP8, SW9 上推时反馈信号为 TP9 (即 TP8 的反相信号),通过操作 SW9 可以确保闭环系统为负反馈。



"参数调节"区域的四个档位开关,用于调节上图中的 RP1~RP4 以改变对应电路模块的 工作参数。实验电路中设置有多个信号测量点,在上图中标注为 TP1~TP9, "信号选择"区 域的 SWB 多选一档位开关选择其中信号之一接入 AD2 示波器 Scope 第 2 通道 CH2。



实验操作的一般流程如下:

- 1. 根据实验要求确定电路组态方案
 - a) 根据实验要求确定需要接入哪些电路模块,相应上推对应电路的钮子开关,并确认 未使用的电路模块对应钮子开关处于下拉位置;
 - b) 判断系统是否需要闭环,如为闭环系统则上推 Panel 左下角的 SW10,如为开环则 下拉 SW10;
 - c) 如果是闭环系统,则判断反馈信号应为 TP8 或是 TP9,以确保系统为负反馈。(基本判断方法是看 CB1~CB8 电路单元的接入个数 n:如 n 为单数则 TP8 与 Vref反相,反馈信号选择 TP8,钮子开关 SW9 应处于下拉位置;如 n 为偶数则 TP8 与 Vref 同相,反馈信号应选择 TP9,钮子开关 SW9 应处于上推位置)
- 2. 根据实验目的选择输入信号
 - a) 根据实验测试的目的, 切换 SWA 档位开关, 选择合适的输入信号;
 - b) 测量阶跃响应时,输入信号为阶跃信号,SWA 旋转到 STEP 档位,并通过"信号选择区域"的 RPO 档位开关设置所需的信号幅值(信号幅值对应档位刻度值*0.5V,例如档位2对应的阶跃信号幅值基本为 2*0.5=1.0V,此数值未经精确调节,略有偏离标准值为正常状态,对于线性系统不影响实验结论);
 - c) 测量稳态误差特性时,位置输入对应 STEP 档位,速度输入对应 RAMP 档位,加速 度输入对应 ACCE 档位。(RAMP 和 ACCE 信号的极性可以通过 STEP 信号的极性进 行调整)
 - d) 测量频率响应特性时,SWA 旋转到 WFG 档位,计算机上运行 WaveForms 软件并 启动 Wavegen 仪器功能,配置通道 1 为正弦波波形并使能输出,即可得到相应的 正弦波输入信号;使用 Network 虚拟仪器功能测量频率响应特性时,Network 虚拟 仪器会自动对 AD2 的函数发生器进行扫频操作,此时将 SWA 旋转到 WFG 档位即 可,不需单独启动 Wavegen 仪器功能(否则会有设备使用冲突提示)。
 - e) SWA 档位开关实现四选一功能,选择的信号经过电压跟随器接至实验电路主回路 作为输入信号 V_{ref},同时此信号也被接至 AD2 示波器 Scope 的第1通道 CH1。
- 3. 根据测量需求选择测点信号
 - a) 根据电路组态及实验信号测量记录的要求,按照系统框图上的标注 TP1~TP9,确定 需要测量的信号标号,将"信号选择"区的"TP 通道选择"档位开关 SWB 旋转到对应 标号;
 - b) SWB 档位开关实现多选一功能,选择的信号被接至 AD2 示波器 Scope 第 2 通道 CH2。
- 4. 根据实验要求调节电路参数
 - a) "参数调节"区域的四个档位开关 RP1~RP4,分别用于调节电路模块 CB2(反相放大器#1)、CB3(一阶惯性环节)、CB5(校正环节)和 CB6(反相放大器#2)的电路参数,当实验用到其中的电路模块时,可以调节相应开关的位置来改变实验对象的传递函数;
 - b) 根据电路模块的原理图及参数设置推导模块及系统的传递函数,所有电路单元模块的原理图在下文有详细说明;
- 5. 测试记录实验结果
 - a) 确认实验装置已通过 USB 接口接至电脑, 电脑上运行 WaveForms 软件, 软件能正常识别并连接 AD2 设备;
 - b) 确认电源接口可靠连接 24VDC 电源,上推电源开关 SW11,三个电源指示灯应该 全亮;

- c) 确认已完成以上 1~4 步骤的操作,在 WaveForms 软件中打开示波器 Scope,设置 相应通道参数;
- d) 按下复位按键并保持几秒时间,同时观察示波器信号状态;然后松开复位按键,观察示波器信号状态变化;根据观察到的信号状态适当调整示波器显示参数,重复操作并记录实验结果;
- e) 使用正弦波作为实验输入信号时, 打开 WaveForms 软件中的 Wavegen 仪器, 按照 实验需要配置通道 1 为正弦波, 设置频率及幅值并使能输出即可。



关于 AD2 配套软件 WaveForms 的使用:

- 1. 可参考"AD2 用户手册.pdf"文件
- 2. 或参考 Digilent 原厂官网资料:

https://digilent.com/reference/software/waveforms/waveforms-3/reference-manual

附录: 电路原理图资料

1. 信号源

由档位开关 RPO 选择分压网络的分压点信号并经过电压跟随器缓冲后,得到阶跃信号 STEP; STEP 信号经过一个反相积分器(传递函数为 $G = -\frac{2}{s}$)后得到斜坡信号 RAMP; RAMP 信号再经过一个反相积分器(传递函数为 $G = -\frac{10}{s}$)后得到抛物线信号 ACCE。



STEP 信号幅值基本对应 RPO 档位刻度值*0.5V, 但分压网络中的 RS1、RS12 变阻器未经 精确调整,因此实际数值会略有偏差,注意这并不会影响实验结果(比如二阶欠阻尼系统的 阶跃响应测量的最大超调量 *M*,和调整时间 *t*₀)。

2. 反相加法器 CB1 (固定参数)



实现输入信号 Vref 与反馈信号 FDBK 的反相相加,即:

$$V_{TP1} = -(V_{VREF} + V_{FDBK})$$

实际连接实验电路时,应确保反馈信号 FDBK 与输入信号 V_{ref}的极性相反,从而实现负 反馈闭环系统中的参考输入与反馈信号相减得到控制误差的操作。

3. 反相放大器#1 CB2(可变参数)



反相放大器对输入信号进行反相放大,档位开关 RP1 控制接入运放反馈回路的总电阻 值,传递函数为:

$$\frac{V_{TP2}}{V_{TP1}} = -\frac{RP1}{R9} = -\frac{K_{RP1} * 10K}{100K} = -0.1K_{RP1}$$

其中*K_{RP1}*为档位开关 RP1 的档位刻度值,数值范围为 0~10,因此本电路环节的信号幅值放大倍数小于等于 1。

4. 反相一阶惯性环节#1 CB3(可变参数)



反相放大器对输入信号进行反相放大,档位开关 RP1 控制接入运放反馈回路的总电阻 值,传递函数为:

 $\frac{V_{TP3}}{V_{TP2}} = -\frac{R15 + RP2}{R14} \frac{1}{(R15 + RP2) \cdot CI3 \cdot s + 1} = -\frac{1 + 10K_{RP2}}{49.9} \frac{1}{(0.001 + 0.01K_{RP2})s + 1}$ 其中 K_{RP2} 为档位开关 RP2 的档位刻度值,数值范围为 0~10。此数值越大,本惯性环节的增益越大,时间常数也越大。

5. 反相一阶惯性环节#2 CB4(固定参数)



本电路为典型的一阶惯性(延迟)环节, 传递函数为: $\frac{V_{TP4}}{V_{TP3}} = -\frac{R12}{R11} \cdot \frac{1}{R12 \cdot CI4 \cdot s + 1} = -\frac{1}{0.2s + 1}$

6. 超前校正环节 CB5(可变参数)



$$101 + 10K_{RP3} > 0$$

因此本电路环节为一个超前校正网络。

7. 反相放大器#2 CB6(可变参数)



本电路结构与反向放大器#1 CB2 电路相同,对输入信号进行反相放大,档位开关 RP4 控制接入运放反馈回路的总电阻值,传递函数为:

$$\frac{V_{TP6}}{V_{TP5}} = -\frac{RP4}{R22} = -\frac{K_{RP4} * 10K}{10K} = -K_{RP4}$$

其中*K_{RP4}*为档位开关 RP4 的档位刻度值,数值范围为 1~11,因此本电路环节的信号幅值放大倍数大于等于 1。

8. 自定义环节 CB7 (默认未接)



自定义环节用于扩展附加实验电路模块,实验装置上默认未接功能电路,对应电路切换的钮子开关 SW7 应处于下拉位置。

根据扩展实验的要求,可以在扩展网络位置处插入功能模块或搭建各类实验电路,比如 PID 电路、二极管或继电器等非线性器件电路等;也可以通过扩展网络输入输出接口连接实 际被控对象装置,比如电机、温控实验装置等。

9. 反相积分器 CB8(固定参数)



这是一个典型的反相积分电路, 传递函数为:



为了减小输入失调电压对长时间积分结果的影响,通常会在反馈回路积分电容上并联一 个大电阻,阻值一般为输入电阻阻值的 10 倍以上。本实验装置设置有积分清零电路,每次 实验之前先对积分电容进行清零,在相对较短的积分时间内,输入失调电压对实验结果的影 响可以忽略不计。

10. 反相器 CB9(固定参数)



反相器是反相放大器放大倍数为1的一个特例, 传递函数为: $\frac{V_{TP9}}{V_{TP8}} = -\frac{R28}{R27} = -1$