

哈尔滨工业大学飞行器控制实验教学中心

自动控制理论（1）实验 指导书

实验一 控制系统基本环节仿真

概 述

为了强化学生对自动控制理论核心课内容的掌握，加强对理论的实际应用能力和动手能力，本实验课程采用半实物仿真（hardware-in-loop simulation）的方式实现。所谓半实物仿真，即是将实物模型和计算机上实现的数学模型连接，组成一个可以运行的仿真系统。进行半实物仿真时，因有实物介入仿真回路，要求仿真是实时进行的，仿真计算机必须在与真实系统同步的条件下，获取动态的输入信号，并实时地产生动态的输出响应。具体来说，就是通过对控制对象原理的学习，基于不同物理系统数学模型上的等价特征，用电子元件在面包板上搭建电子网络来模拟实物控制对象，然后通过数据采集卡和计算机相连，从而可以通过 MATLAB 产生指定输入信号、接收对象的输出信号，以此可以实现对象的分析，也可以通过 MATLAB 在计算机上设计控制器，达到控制系统的目的。

本实验设备引入元件化、离散化理念，实验设备只提供实验面板，以及电阻、电容、运算放大器等电子元器件，由学生自己设计和搭建各种线性、非线性环节及系统。检测和控制接口部分采用运动控制卡，结合 RTWT（Real-Time Windows Target）技术，完成 MATLAB 与控制卡的无缝连接，实现 MATLAB 环境下的实时数字

化控制。灵活的元件化设计可以模拟多种控制对象的实物模型，同时利用 **MATLAB** 的强大功能，能进行先进控制算法设计、复杂控制系统实验，并且可替代频率发生器、示波器、频率检测仪、函数记录仪等设备。设备可组成各种阶次的控制系统，能开设控制系统的时域分析、频率特性分析等传统实验；也可组成复杂控制系统，进行模型参数辨识、控制系统仿真、先进控制算法等设计型实验；还能自主设计实验对象，开展复杂控制算法实验。

本实验分为基本实验内容和研究性实验内容两种。基本实验内容可以完成设定的实验包括：控制系统的数学建模、二阶控制系统的时域分析、控制对象频率特性测试、控制系统设计等多种控制理论实验。研究性实验则非常灵活，借助运动控制卡可实现基本的数据的输入输出，**MATLAB** 可实现控制算法和系统模型的构建，两者的结合可实现任何的实验系统，达到实验者进行相应控制理论研究目的，实验者可自行设计控制系统并选择实验方式和方法。

第一章 实验系统介绍

本实验需要通过计算机对控制对象进行实时控制，系统主要包括控制对象、数据采集和信号输出部分以及控制平台，如图 1-1 所示。控制对象是通过模拟电路来实现的，具体来说，就是采用电子元器件在面包板上搭建电路，进而模拟控制对象。数据采集和信号输出部分主要包括接口电路和运动控制卡。实验箱上有模拟输入和输出通道，分别用作数据采集和信号输出通道。实验箱内部集成了高精度的运动控制卡，可以实现数据采集和信号输出功能。系统的控制平台为数字计算机，通过计算机中 MATLAB 的实时控制工具箱，对系统性能进行分析和设计控制器。

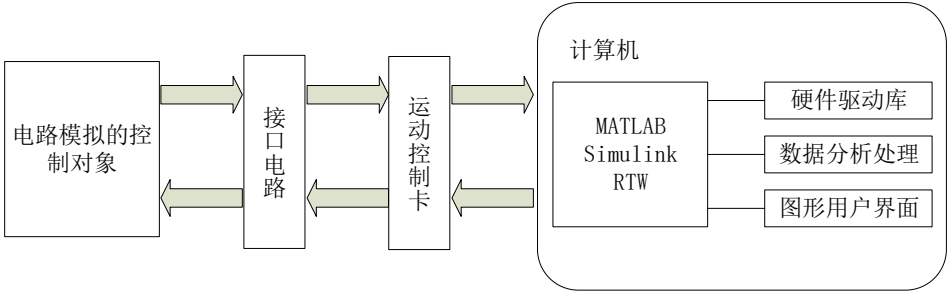


图 1-1 系统组成原理图

第一节 硬件组成

系统的硬件部分，包括计算机、实验箱以及若干电子元器件。其中 实验箱如图 1-2 自动控制实验箱所示。实验中所用到的若干电子元器件如下所示。

第二节 软件组成

系统的软件部分通过 MATLAB 实现，基于实时工作空间 Real-Time Workshop(RTW)对系统进行控制。系统的运动控制卡配套的软件 GTS-400-PV Function Blocks 是和 MATLAB 完全兼容的，只需要在 MATLAB 中安装对应的工具包即可使用。

Simulink 是一个动态系统建模仿真和分析的软件包。它是基于 Matlab 的框图设计环境，支持线性系统和非线性系统，可以采用连续采样时间、离散采样时间或者两者混合的采样时间建模。Simulink 提供了一个建立模型方块图的图形用户接口(GUI)，操作简单便捷

GTS-400-PV Function Blocks 也是图形化的操作界面，兼容 Simulink 工具箱。其中的一些常用模块如图 1-3 所示。

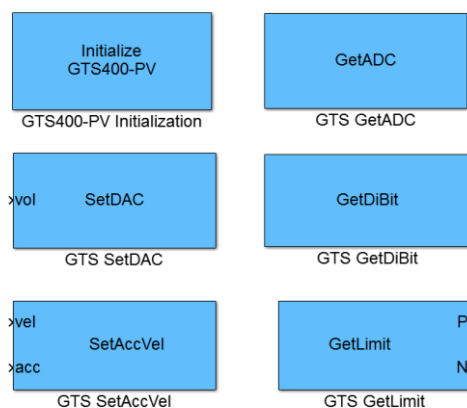


图 1-3 GTS-400-PV 常用模块

在本实验中，最常用的的是 GTS400-PV initialization、GTS GetADC、GTS SetDAC。以下将分别介绍三个模块的用途。

GTS400-PV initialization: 用于对系统进行初始化处理。每一个仿真文件中都必须添加此模块，否则在程序编译、连接上会出错。

GTS GetADC: 用于接收信号，将运动控制卡采集到的数据导入仿真程序中，进行实时控制。

GTS SetDAC: 用于输出控制信号，在计算机中处理完后，可以让对应的信号通过实验箱上模拟输出通道输出，作为系统的输入信号。

注：实验设备详细使用和功能见《自动控制理论实验装置使用说明》

第二章 基本环节的模拟及仿真

一、实验目的

- 1、了解基本环节电路模型
- 2、掌握基本环节的电路搭建
- 3、掌握基本环节的 Matlab/Simulink 的半实物仿真方法

二、实验内容及步骤

实验过程中，需要在面包板上搭建模拟电路来实现系统的传递函数，作为被控对象进行系统分析与研究。其中涉及一些典型基本环节电路模型和常用电路，搭建模拟电路主要是基于运算放大器来实现的。

1、基本环节对应的模拟电路

(1)放大环节

传递函数 $\frac{Y(s)}{X(s)} = K$ ，其中 $K = \frac{R_1}{R_0}$ ，取 $K=10$

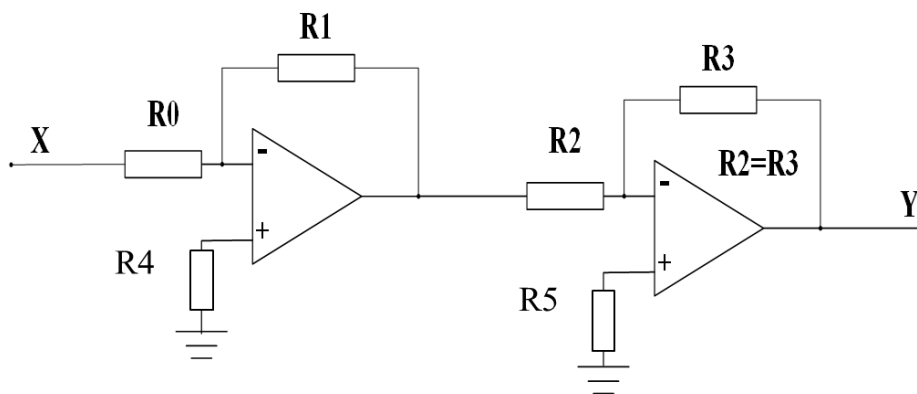


图 2-1 放大环节电路原理图

(2)积分环节

传递函数 $\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{Ts}$ ，其中 $T = R_0C$ ，取 $T=0.1$

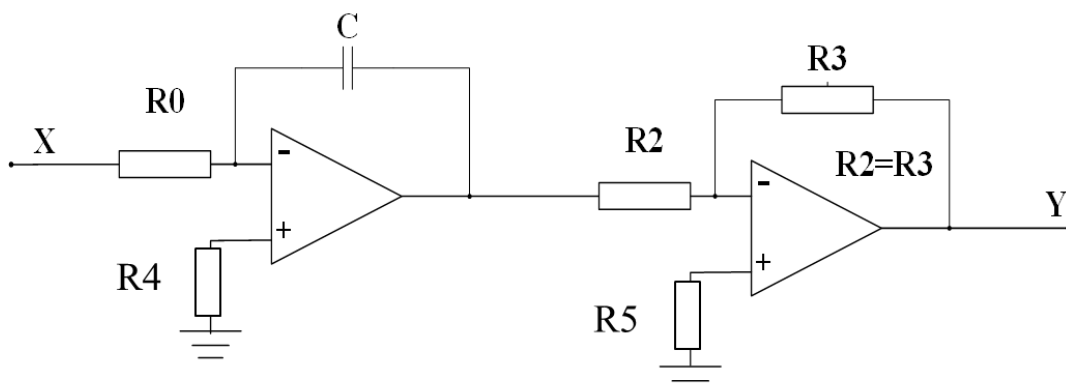


图 2-2 积分环节电路原理图

(3)惯性环节

传递函数

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{Ts+1}, \text{其中 } K = \frac{R_1}{R_0}, T = R_1C, \text{ 取 } K=20, T=0.2$$

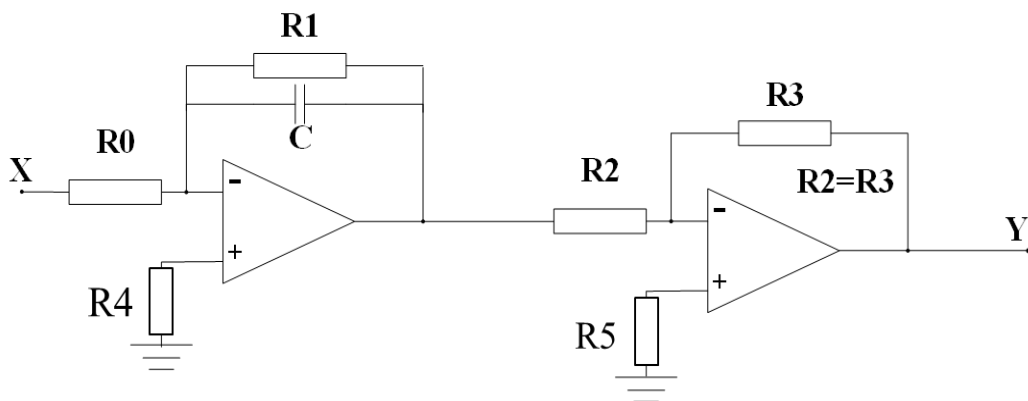


图 2-3 惯性环节电路原理图

特别提示：实验内容 2，以单人或组为单位完成；实验内容 3 和 4，需单人完成。完成实验操作后，需要通过指导教师验收，并签字确认，才可获得该部分的实验操作分数！

2、基于 Matlab/Simulink 库函数中的运放、阻容器件，在 Simulink 中搭建以上环节的仿真模型，并对模型进行测试。

说明：

1) 新建 Simulink 建模文件，在 Simulink library 的 Simscape/Foundation library/ Electrical / Electrical Elements 中，选择电阻、电容、运放、接地模块添加到建模文件中，按照基本环节的电路结构，建立模型主体电路；

2) 添加输入端和输出端所用的模块：

①在 Simscape/Utilities 中，选择 Simulink-PS Converter 模块、PS-Simulink Converter 模块和 Solver configuration 模块添加到建模文件，

②在 Simscape/Foudation Library/Electrical/Electrical Sources 中，选择 Controlled Voltage Source 模块添加到建模文件中，

③在 Simscape/Foudation Library/Electrical/Electrical Sensors 中,选择 Voltage Sensor 模块添加到建模文件中，

④在 Simulink/Commonly Used Blocks 中，选择 In1 模块和 Out1 模块添加到建模文件中

3)在整个模型的输入端接入 In1 模块 Simulink-PS Converter 模块、Controlled Voltage Source 模块和 Solver Configuration 模块；在整个模型的输出端接入 Voltage Sensor、PS-Simulink Converter 模块和 Out1 模块。

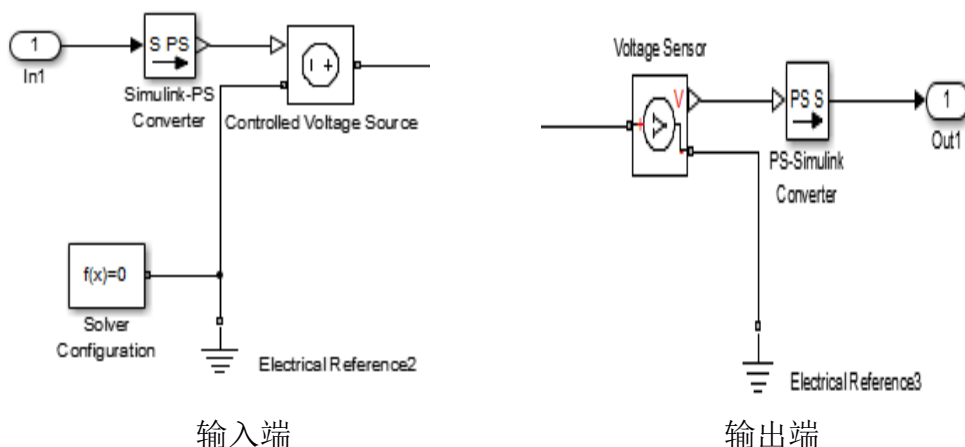


图 2-4 输入端、输出端模块连接方式

4) 设置模块参数：根据实验要求，设置电阻、电容模块的数值，满足基本环节的参数要求。

5) 在 Analysis 的 Control Design 中选择 Linear Analysis 功能，在

Analysis I/Os 中选择 Root level inports and outports, 在 Plot Result 中选择 New Step, 点击绿色三角 Linearize, 就可以生成基本环节的阶跃响应曲线。

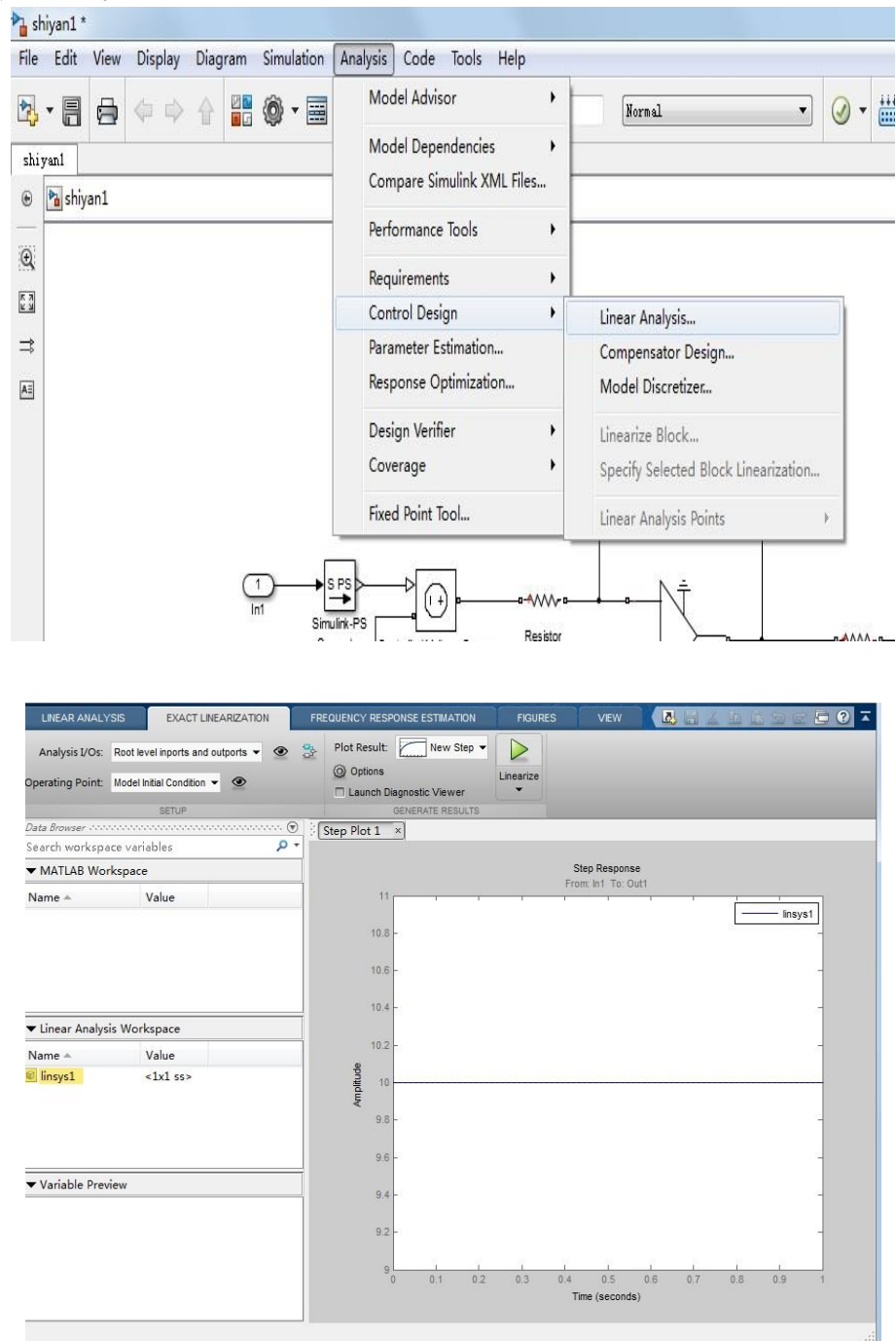
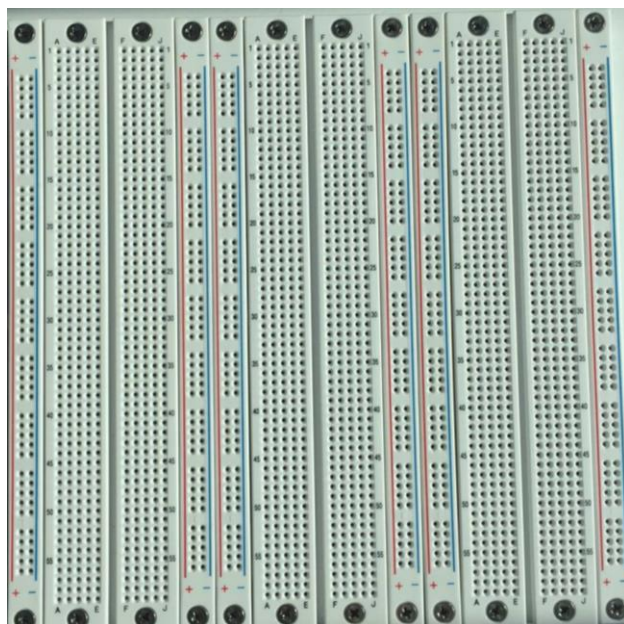


图 2-5 Linear Analysis 分析阶跃响应

3、在“控制对象构建区”，使用运算放大器、电阻、电容器件，在面包板上分别搭建 3 个基本环节的电子线路。

说明：

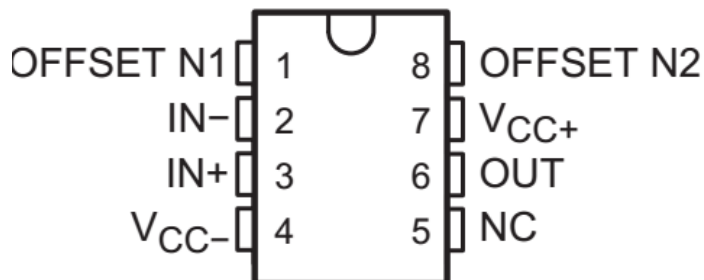
1) 控制对象构建区由 3 块面包板组成，



标有+和-号的位置，是整列导通的，用于连接 $\pm 12\text{V}$ 电源以及 GND 接地，使用时注意尽量将 $+12\text{V}$ 和 -12V 分开，分别放在最右侧和最左侧位置；其余的面包板插孔是横向 A-E 导通，F-J 导通，中间有纵向沟槽。

注：实验使用单独的配发的小面包板进行电路搭建

2) 运算放大器使用 OP07，器件引脚分布如下图：



3) 根据电路要求，自行配置电阻，电容器件；电阻可选 $10\text{K}\Omega$ ， $100\text{K}\Omega$ ， $200\text{K}\Omega$ （阻值可参照电阻色环表读取或使

用示波表测试) 电容可选用 $1\mu\text{F}$ (105) , $10\mu\text{F}$ (106);
4、基于 Matlab/Simulink 和基本环节的电子线路, 进行半实物仿真实验 (参照 “三、实验方案”), 分别搭建 3 个开环仿真系统, 输入信号选为阶跃信号 (积分环节和惯性环节的阶跃信号幅值设置为 0.1), 分别观测 3 个基本环节的输出曲线。(组内同学可共用 simulink 仿真文件测试电子线路)

三、实验方案

实验前, 请仔细阅读 “四 、实验要求”!

1、在实验箱上搭建电路。搭建过程中, 需要注意运算放大器采用正负电源供电才可以正常工作, 用实验箱上 $\pm 12\text{V}$ 供电。即运算放大器正电源端用 $+12\text{V}$ 供电, 运算放大器负电源端用 -12V 电源供电。

2、将电路和实验箱连接起来。实验箱上有“模拟量输入”和“模拟量输出”, 如图 2-6 所示。其中“模拟量输出”表示计算机输出信号的端口。“模拟量输入”指的是计算机接收信号的端口。将“模拟量输出 AO1”和所搭电路的输入连接, “模拟量输入 AI1”和所搭电路的输出连接 (选择其他 AO、AI 端口也可)。另外, 实验箱上“模拟量输出 AO1”和“模拟量输入 AI1”的对应的 GND 要和面包板电路的 GND 以及电源 GND 相连, 即整个电路所有 GND 都要一致。

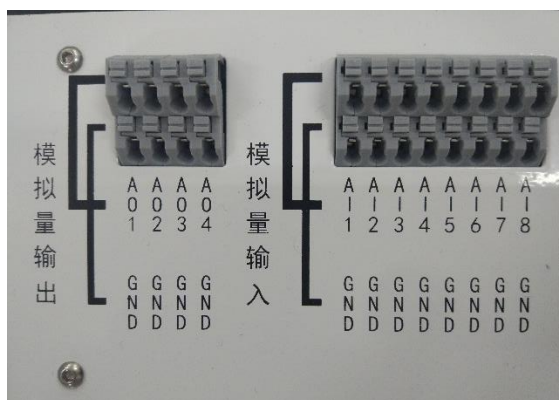


图 2-6 模拟输入模拟输出

3、在 MATLAB 中建立仿真文件。

(1) 打开 MATLAB, 进入 simulink 仿真界面, 新建 simulink

仿真文件，并将其保存至桌面的文件夹中。

(2) 放置实时仿真模块“GTS SetDAC”和“GTS GetADC”:

①在 Libraries 中找到目录 Googol Education Products v2.0 下的 GTS-400-PV Function Blocks，即可找到所需模块。“GTS SetDAC”模块对应计算机输出端口，用于给实际对象设定输入信号。“GTS GetADC”模块对应计算机接收信号的端口。

②在“GTS SetDAC”模块前加饱和环节，限幅 $\pm 10V$,防止输入信号过大损坏实验箱和破坏电路。

③设置“GTS SetDAC”模块和“GTS GetADC”模块。双击模块设置 Port Number 的值，并且要和实验箱上选择的“模拟量输出”和“模拟量输入”端口对应，例如实验箱上选择 AO1, AI1 端口，则对应模块的 Port Number 值都设置为 1，如使用其他端口，按照端口号设置 Port Number 值。

(3) 放置实时仿真模块“Initialize GTS400-PV”。设置参数 ServoON/OFF 的值设置为“1”。Motion Mode 的值设置为“0”。

(4) 添加所需的其它常规仿真模块，如信号源、示波器等。示波器 Scope 设置时，建议将 History 下的“Limit data points to last : 5000”的勾选去掉，保证波形的完整，将放置好的模块按照图 2-7 的仿真界面连接。

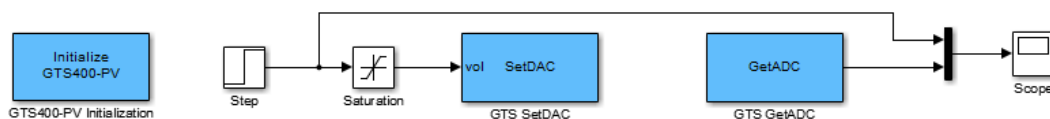


图 2-7 半实物仿真界面

(5) 参数配置

I、在仿真文件界面，打开“Simulation/Model Configuration Parameters”,进行参数配置。

①将 Solver 中“Solver options”下，Type 改为“Fixed-step”,Solver 改为“ode1(Euler)”。“Fixed-step size”改为 0.001,也可以自行设置。

②将 Code Generation 中 System target file 改为“rtwin.tlc”。

II、在仿真文件界面，打开“Code/External Mode Control Panel”，点击“Configuration”下的“Signal&Triggering”进行参数配置。将“Duration”的数值改大一些，比如“200000”。从而保证 Scope 示波器中波形的完整呈现。

III、仿真运行。点击“编译”，再点击“连接”，最后点击“运行”，如图 2-6 所示，之后即可由示波器观察仿真图像。

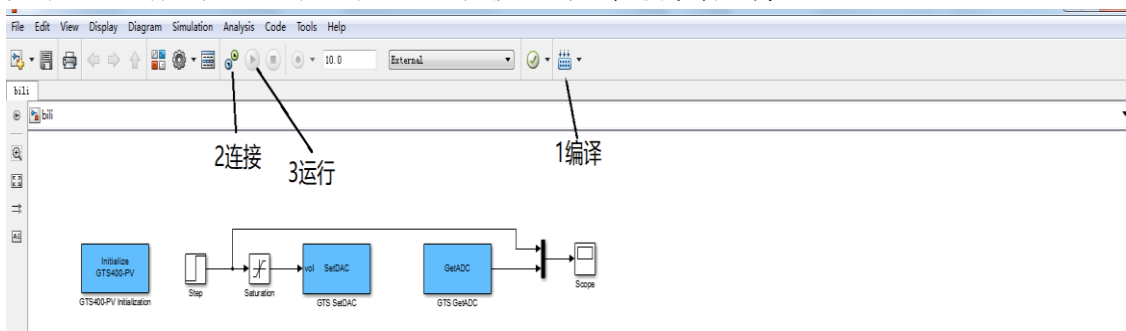
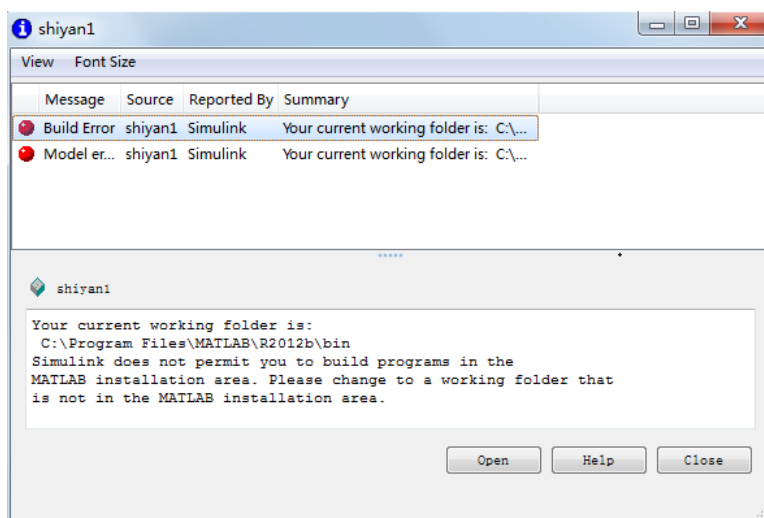
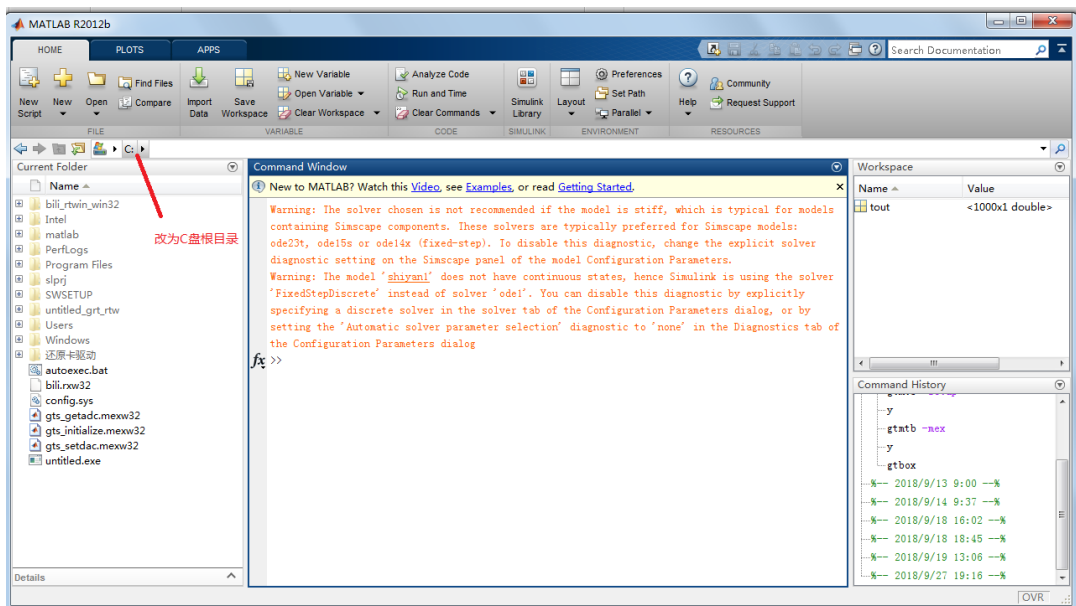


图 2-8 仿真运行

实验中，当更改系统的仿真设置时，如更改了系统连线，添加了其他仿真模块，或更改仿真步长，此时需重新编译，否则系统会报错。另外，编译时，需更改 MATLAB 默认的当前路径，否则编译过程会报错，出现下面的错误提示：



解决方法：在 matlab 主程序界面，修改工作目录，如修改为 C: 根目录下



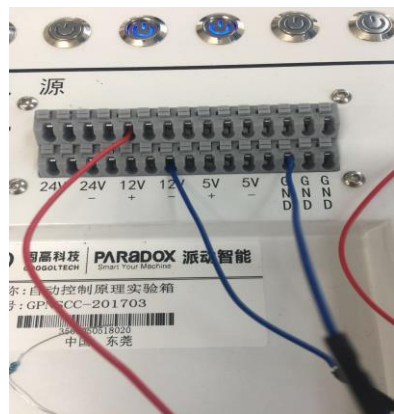
四、实验要求

1、仔细检查搭建好的电子线路，确保无错接、虚接、短路等错误。

2、电源和模拟量端子，已经接好线，只需连接到面包板上即可，实验结束后不要拆电源和模拟量端子的线，不要拆，不要拆！

3、杜邦线用作延长及在面包板上走线。

4、电位器第1列为可调端。



5、每次改变电路，更换器件，实验箱必须断电！断电！断电！

6、当重复实验，且电路中存在电容器件时，期间需要关闭实验箱电源，并对电容放电（使用电阻接触电容两端引脚一定时间），

否则电路不是零状态。

7、指导教师检查后，方可进行通电实验。

8、每位同学 1 个元器件盒，盒内装有实验所需的电子元器件实验盒需要自行保存，下次实验继续使用同一元器件盒，本学期所有实验结束后上交回收。

五、实验结果记录

1、保存 3 个基本环节在 simulink 建模仿真模型框图及响应图；

2、保存搭建完成的 3 个基本环节的电子线路图片，并在下面表格中填写所使用的电阻、电容的数值。

	放大环节	积分环节	惯性环节
电阻 R0			
电阻 R1			
电容 C			
电阻 R2			
电阻 R3			
电阻 R4			
电阻 R5			

3、保存 3 个基本环节半实物仿真时的输出响应图。