



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

自动控制原理实验 A(1)

实验指导书

(2018 版 16 学时)

自动化与电气教学研究实验中心

2018 年 7 月



目录

概 述.....	1
基本要求与注意事项	2
一、安全操作守则.....	2
二、预习要求.....	2
三、出勤要求.....	2
第一部分 实验系统操作指导	3
1.1 电子模拟机.....	4
1.2 数据采集卡	5
1.3 数字计算机.....	5
1.4 实验导线	5
2 电路基础知识.....	5
2.1 运算放大器	5
2.2 电阻的测量	8
2.3 常见问题的排除方法	8
3 实验系统软件介绍.....	9
3.1 MATLAB 简介.....	9
3.2 实验系统软件使用	11
3.3 研究性实验方法	12
第二部分 自动控制原理实验指导	13
实验一 时域响应测试与性能分析实验	13
一、实验目的	13
二、实验内容	13
三、实验设备	13
四、预习要求	14

五、实验原理	14
六、实验步骤	16
七、注意事项	16
八、实验报告要求	17
九、课后思考题	17
十、参考资料	17
实验二 高阶系统性能分析与数值仿真实验	18
一、实验目的	18
二、实验内容	18
三、实验设备	19
四、预习要求	19
五、实验原理	19
六、实验步骤	21
七、注意事项	23
八、实验报告要求	23
九、课后思考题	23
十、参考资料	23
实验三 频率特性测试与频域分析法建模实验	24
一、实验目的	24
二、实验内容	24
三、实验设备	25
四、预习要求	25
五、实验原理	25
六、实验步骤	26
七、注意事项	27
八、实验报告要求	27
九、课后思考题	28
十、参考资料	28

实验四 串联校正设计实验	29
一、实验目的	29
二、实验内容	29
三、实验设备	29
四、预习要求	30
五、实验原理	30
六、实验步骤	33
七、注意事项	34
八、实验报告要求	34
九、课后思考题	34
十、参考资料	34
实验五 控制系统测试、设计综合实验	36
一、实验目的	36
二、实验内容	36
三、实验设备	36
四、预习要求	37
五、实验原理	37
六、实验步骤	40
七、注意事项	40
八、实验报告要求	40
九、课后思考题	40
十、参考资料	40
附件 1 实验报告模板	42

概 述

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院自动化与电气教学研究实验中心下属自动控制原理实验室面向全校开放，承担全校自动控制原理的本科生实验教学。本实验指导书所涉及的自动控制原理实验采用虚拟仿真、半实物仿真、实物实验等多种手段，采用虚实结合的方式实现。

其中半实物仿真一般是把数学模型、实体模型和系统的实际设备联系在一起进行运行，组成仿真系统。而在对此系统进行仿真时，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。其控制器可以由计算机实现，将控制对象作为实物直接放置在仿真回路中，构造起半实物仿真系统。自动化与电气教学研究实验中心自行开发了 PCI 数据采集卡在 MATLAB 下的驱动程序，可实现在 MATLAB 下实时的数据输出和采集，该驱动程序是整个实验系统的核心。

实物实验采用丝杠作为对象，滚珠丝杠是工具机械和精细机械用到最多的传动部件。其主要功用是将旋转运动转换为直线运动等，具有高精度，可逆和高效率特性。因为其摩擦阻力小，滚珠丝杆普遍用在多种工业设施和精细仪器，在工业自动化中也起着重要的作用。采用罗克韦尔公司 PLC、变频器等产品，完成对丝杠系统的建模、仿真、控制等，形成一套相对综合并与工业现场产品相吻合的实验项目。

虚拟仿真实验是近些年新开发的一套实验教学系统。学生可以通过本地或远程的方式进行虚拟仿真实验。以模拟机、丝杠、桥式吊车、倒立摆等作为对象，进行虚拟仿真实验。这样可以有效扩展实验的时间与空间，便于学生随时进行学习与研究。

实验采用自主性和研究性的方法，分为基本实验内容和研究性实验内容两种。基本实验内容包括：典型环节实验、频率特性测试、控制系统串联校正、PID 控制器、状态反馈与观测器、采样系统研究实验、非线性环节实验等多种控制理论实验。研究性实验则非常灵活，借助硬件驱动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的目的。实验者可在根据自身情况选择实验方式和方法。自动控制原理实验以学生自主实验为主，教师指导为辅，因此要求学生实验前应完成相关部分的理论课程学习，具备一定的 MATLAB 基础，并进行提前预习。

基本要求与注意事项

一、安全操作守则

1. 首次进入实验室参加实验的学生应认真听取实验指导教师对于安全内容的介绍。
2. 实验室总电源由指导教师负责，学生不得擅自接触。
3. 严禁携带易燃、易爆等危险品进入实验室。
4. 禁止携带食物进入实验室，实验过程中需妥善保管好水杯、饮料瓶等容器。
5. 严禁带电接线、拆线、接触带电裸露部位。
6. 各种仪表、设备在使用前应先确认其工作正常，若实验过程中出现问题或发生故障，应及时切断电源并按照实验指导书实验系统操作指导 2.3 节内容自行排错，或者报告指导教师，严禁自行拆解实验设备。
7. 实验室内禁止打闹、大声喧哗、乱扔杂物以及其它不文明行为。
8. 实验开始后，学生不得远离实验装置或做与实验无关的事。
9. 学生完成实验后，报告指导教师检查实验数据或结果，待指导教师确认无误后，方可拆除实验线路，关闭各种仪表、设备，将其摆放整齐，并整理实验台桌椅。
10. 实验结束后，学生整理好各自携带物品方可离开。

二、预习要求

实验课前，学生需要认真阅读《自动控制原理实验 A（1）实验指导书》概述部分，了解课程重要性 with 基本实验方式，同时就实验系统操作指导的内容进行预习，掌握实验系统组成与基本操作方法。

学生每次实验前需要认真复习自动控制原理、电路等相关知识，并对当次实验进行预习，完成预习思考、模拟电路设计、控制器设计等相关内容。

三、出勤要求

学生须按照实验中心网站上选定的实验时间出勤并独立完成实验。如不能按时实验，需要课前提交医院、团委等单位确认盖章的请假条，否则一律按旷课处理。

实验课后根据要求及时撰写实验报告，并于一周内通过实验中心网站上传。

第一部分 实验系统操作指导

自动控制原理实验采用半实物仿真方式，实验用的混合仿真系统主要由三部分组成：数字仿真计算机（数字计算机）、模拟仿真设备（电子模拟机）、数模转换设备（数据采集板）。数字计算机是一台通用微机，内存大，计算速度快，包括 Windows 操作系统、MATLAB（带 Simulink 和 Real-Time Workshop 以及相关工具箱）、数据库、用户界面开发软件等。电子模拟机是以多个运算放大器为核心的集成电路板，包括各种电路控制器件，可以搭建各种控制对象。数模转换设备也是一个重要的组成部分，因被测设备的千差万别，系统中可以重点考虑通常情况下的 A/D、D/A 转换设备，当被测信号特殊时，可以设计专用的信号输入转换设备。本系统采用 A/D、D/A 转换设备，具有如下功能：10 路 12 位模数转换器 A/D 端口，2 路 12 位数模转换器 D/A 端口，1 路 16 位数字量输入 DI 端口，2 路 16 位数字量输出 DO 端口。系统实物图和硬件结构图分别如图 1.0.1、图 1.0.2 所示。



图 1.0.1 混合仿真系统实物图

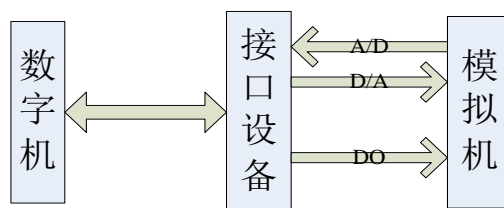


图 1.0.2 混合仿真系统硬件结构图

1.1 电子模拟机

HHMN-1 型电子模拟机用来对控制系统实现电子模拟，通过在电子模拟机上搭接模拟电路的方法来实现各种典型环节和控制系统的传递函数，电子模拟机如图 1.1.1 所示。

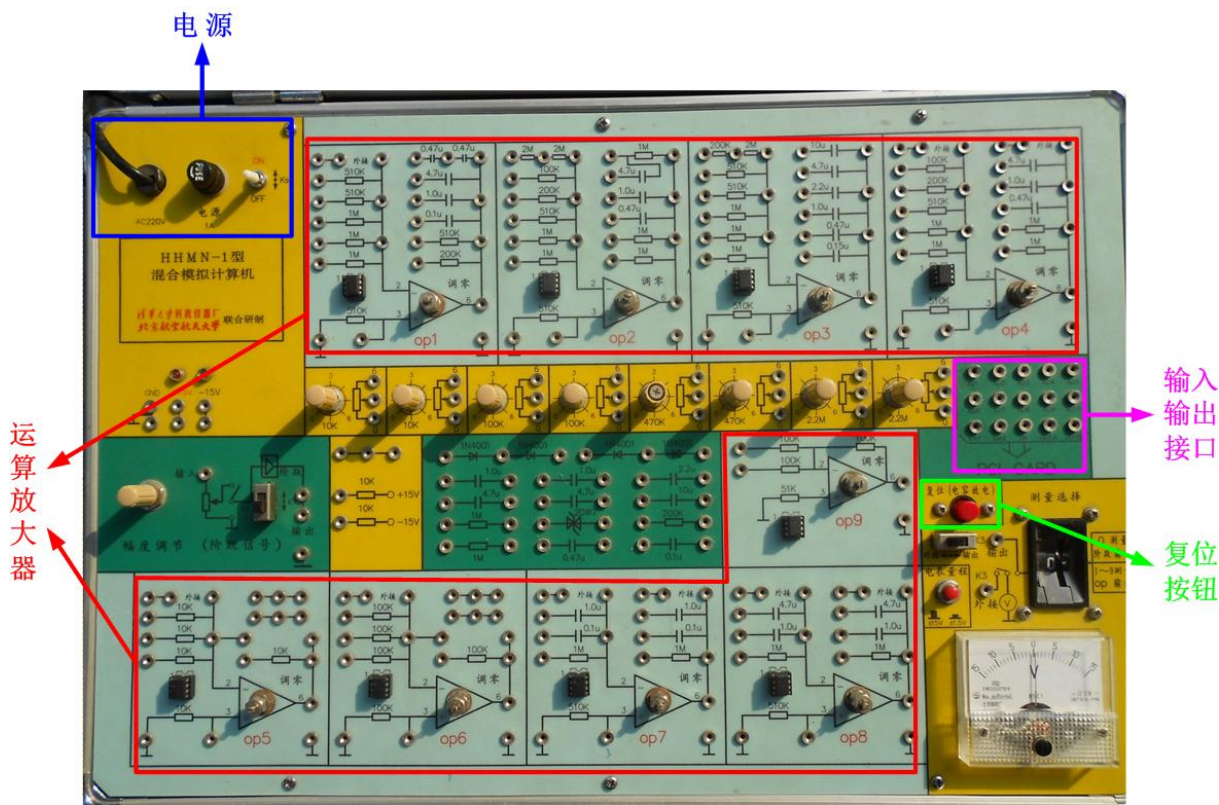


图 1.1.1 电子模拟机示意图

电子模拟机以积分器和加法器为基础，分为九个单独的运算放大器模块，配置了二极管、电位计、分压器、电阻、电容等部件，每个运放模块都相互独立，如果各部件之间有黑线连接则说明是连通的，不再需要导线连接，相反则需要用导线进行连接使用。模拟机后面有一个 37 针 D 型头接口和计算机内的数据采集板进行连接通信，模拟机上所有的共地点都已经连好，不再需要连接。模拟机右侧有 10 路 A/D（模拟量输入采集），2 路 D/A（模拟量输出）的插孔，实验者可根据实验要求自行连接。在进行系统的输入输出端和模拟机接口进行连接时，应特别小心，不要接错，在连接好了以后要请老师检查后再接通电源。

模拟机右侧配有一个红色按钮，是电容放电（复位）按钮，每次开始实验采集数据前均要按下“复位”键，使每个积分器反馈回路中的电容通过按键的 a、b 接点放电，消除电容上的残余电荷，从而提高重复运算的精度，尽量消除零点和积分漂移对系统的影响，复位电路如图 1.1.2 所示。

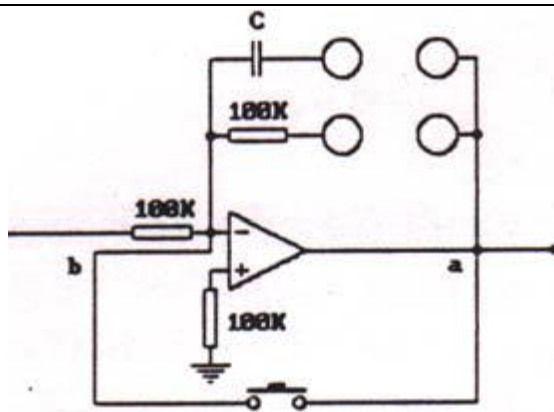


图 1.1.2 模拟机电容复位电路

1.2 数据采集卡

数据采集卡可用于完成数字量和模拟量之间的相互转换，并可模拟量和数字量的输入输出。实验室所采用的是基于 PCI 总线多功能模入模出接口卡，本卡具有 12 位精度的 A/D 和 D/A，同时具备 16 位数字量输入和 16 位数字量输出。

1.3 数字计算机

在该混合仿真系统中，数字机主要用于被测设备仿真模型库的建立、控制仿真程序的运行和用户界面程序、仿真结果的分析和判断等。

1.4 实验导线

实验中所使用的导线，是一次压制成型的，导线插头采用自锁紧方式，插头插入后顺时针方向旋转一定角度即可锁紧，拔除时逆时针方向旋转后方可拔出，严禁拉着导线拔出，这样容易造成导线不易发现的损坏，给实验带来不必要的麻烦，同时造成财产的损失。另外，不可以带电插拔导线。

2 电路基础知识

实验过程中，通过在电子模拟机上搭建模拟电路实现各种典型环节或系统的传递函数，作为被控对象进行系统分析与研究。因此，实验过程中涉及一些电路的基础知识，这里做简单介绍。

2.1 运算放大器

运算放大器是一种用来完成各种数学运算的元件，如进行反号、加法和积分运算。运算放大器是一种直流放大器，它具有很高的增益，因此从放大器的输出端到反相输入端需要负反馈以保证放大器的稳定。运算放大器有两个输入端和一个输出端，通常所使

用的是运放带（-）号的反相输入端，不可使用带（+）号的同相输入端。所以要注意运算放大器的极性，一个运算放大器将改变一次代数符号，尤其在使用多个运算放大器连接单位负反馈时一定不要接错。模拟机上配备的运算放大器芯片技术资料如下：

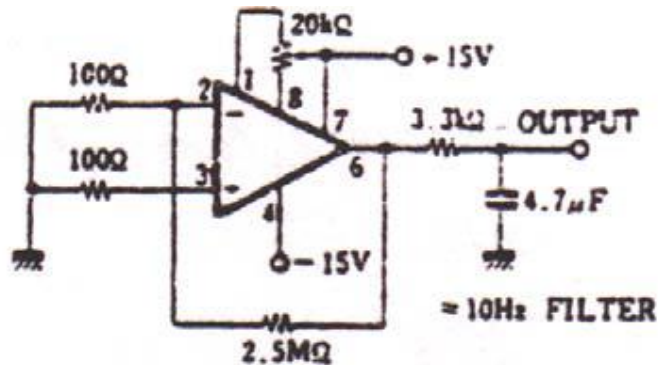
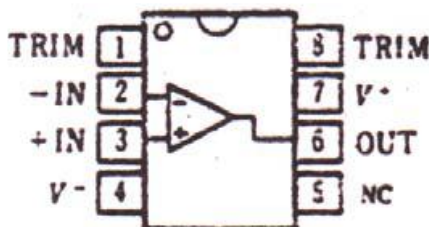


图 1.2.1 op07 管脚图

图 1.2.2 典型电路

主要电特性：

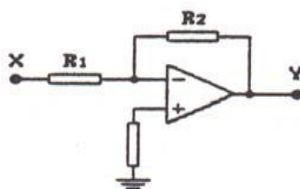
- ① 输入失调电压：85μV
- ② 输入失调电压温飘：0.5μV/°C
- ③ 输入电阻：33MΩ
- ④ 电压增益：400V/mV
- ⑤ 增益带宽积：0.6MHz
- ⑥ 电源电压：±22V
- ⑦ 输出电压：±11V

典型环节的传递函数及其模拟电路：

- ① 比例放大环节

传递函数
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = -K \quad K = \frac{R_2}{R_1}$$

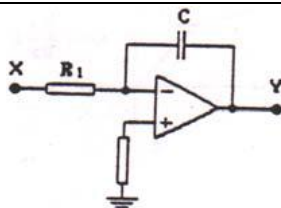
模拟运算电路



- ② 积分环节

传递函数
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = -\frac{1}{Ts} \quad T = R_1 C$$

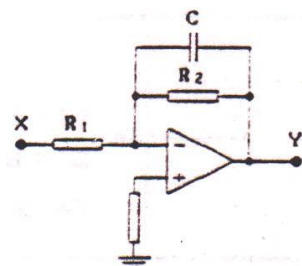
模拟运算电路



③ 一阶惯性环节

传递函数 $\frac{Y(s)}{X(s)} = -\frac{K}{Ts+1} \quad T = R_2C \quad K = \frac{R_2}{R_1}$

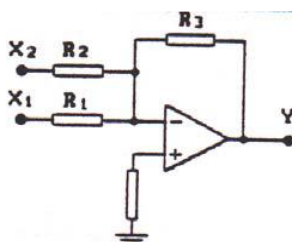
模拟运算电路



④ 求和

传递函数 $Y(s) = -[K_1X_1(s) + K_2X_2(s)] \quad K_1 = \frac{R_3}{R_1} \quad K_2 = \frac{R_3}{R_2}$

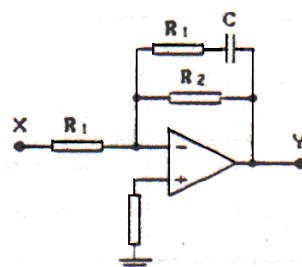
模拟运算电路



⑤ 比例—积分环节

传递函数 $\frac{Y(s)}{X(s)} = -K \frac{T_1s+1}{T_2s+1} \quad T_1 = R_1C \quad T_2 = (R_1+R_2)C \quad K = \frac{R_2}{R_1}$

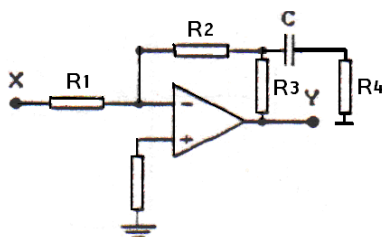
模拟运算电路



⑥ 比例—微分环节

传递函数 $\frac{Y(s)}{X(s)} = -K \frac{T_d s + 1}{Ts + 1} \quad T_d = \left(R_4 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right) C \quad T = R_4 C \quad K = \frac{R_2 + R_3}{R_1}$

模拟运算电路



2.2 电阻的测量

使用数字万用表测量电阻阻值时，应当注意以下几个方面：首先应使用与希望值接近的电阻量程；其次测量电阻时，要将模拟机的电源关上，带电测量电阻量出的阻值是不准确的；第三，在测量电阻时一定要尽量保证对电阻进行单独测量，将电阻两端的导线拔去后，直接测量电阻的两端，以免受到其它电子元件的影响。

2.3 常见问题的排除方法

问题一（使用不当）：由于运算放大器通常需要搭成负反馈，以保证其工作稳定，因此在选择电阻和电容时，一定要注意不能够单独使用运算放大器输出端的电阻和电容（如图 1.2.3 所示方框内的部分）。

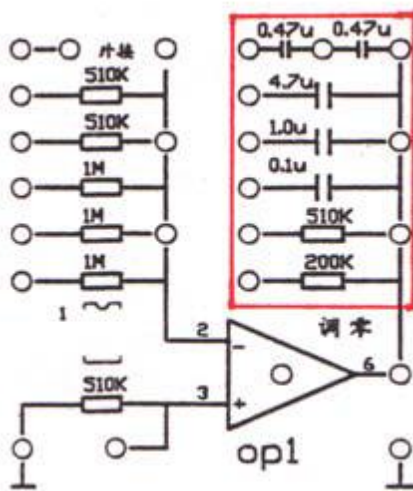


图 1.2.3 运算放大器连接电路图

问题二（导线损坏）：检查导线是否损坏的方法是使用万用表测量每根导线，察看每一根导线是否连通。

问题三（运放损坏）：判断运算放大器是否正常，较简单的方法是在运算放大器上搭接反相器，分别测量其输入和输出的电压，因为反相器的传递函数为-1，其输出和输入的电压应正好相反（运放已经调零）。测试电路的连接方法如下：

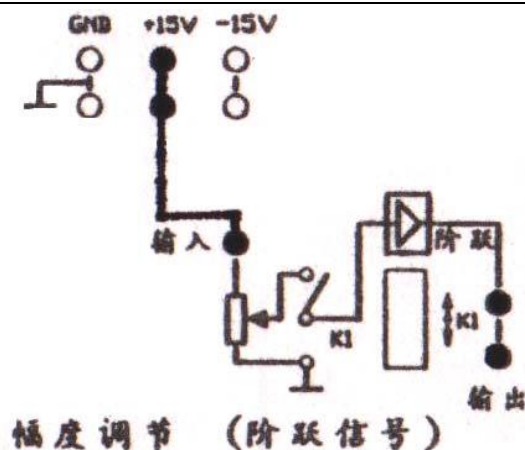


图 1.2.4 电源连接方法

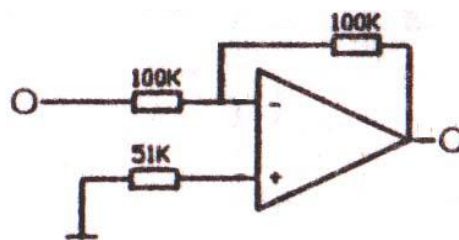


图 1.2.5 反相器连接方法

图 1.2.4 为电子模拟机左侧电源部分的连接方法，将+15V 与阶跃信号的输入连接，阶跃信号的输出与反相器的输入连接，反相器的连接方法如图 1.2.5（反相器为反馈电阻和输入电阻的阻值相同）。

3 实验系统软件介绍

3.1 MATLAB 简介

MATLAB 是美国 MathWorks 公司开发的软件产品，它提供了丰富的指令和控制工具箱，Simulink 是其中的可视化图形工具包，提供了图形化的动态系统建模、仿真、分析界面，RTW（Real-Time Workshop）是 MATLAB 图形建模和仿真环境 Simulink 的一个重要的补充功能模块，它能直接从 Simulink 的模型中产生优化的、可移植的和个性化的代码，并根据目标配制自动生成多种环境下的程序。利用它可加速仿真过程，或生成可在不同的快速原型化实时环境下的程序，通过使用 RTW，可以将主要精力集中在系统设计上，使半实物仿真的优势得以充分体现，能够实现 Simulink 和 Matlab 的无缝集成与连接。

Real-Time Workshop(RTW)结合 MATLAB 内的其他产品，最常见的是 Simulink 和 Stateflow 一起进行产品开发在国外是十分流行的，有着大量成功的案例。这些成功的案例包括美国国家航天局（NASA），日本的 Nissan 等都得益于它集成开发的，大大缩短开发周期和经费。霍尼韦尔的 Commuter 航电公司更新用于 Primus 航电系统的飞行控制软件时，它们采用 Simulink 与 Real-Time Workshop。通过它们进行建模与代码生成环境使得该公司节约了时间并获得了高质量的代码。所开发的飞行控制系统 60%的最终代码是由 Real-Time Workshop 自动生成的。其余的旧代码与手工优化的代码中集成进来。并

在 1998 年 6 月这一系统被广泛地飞行测试所认证。

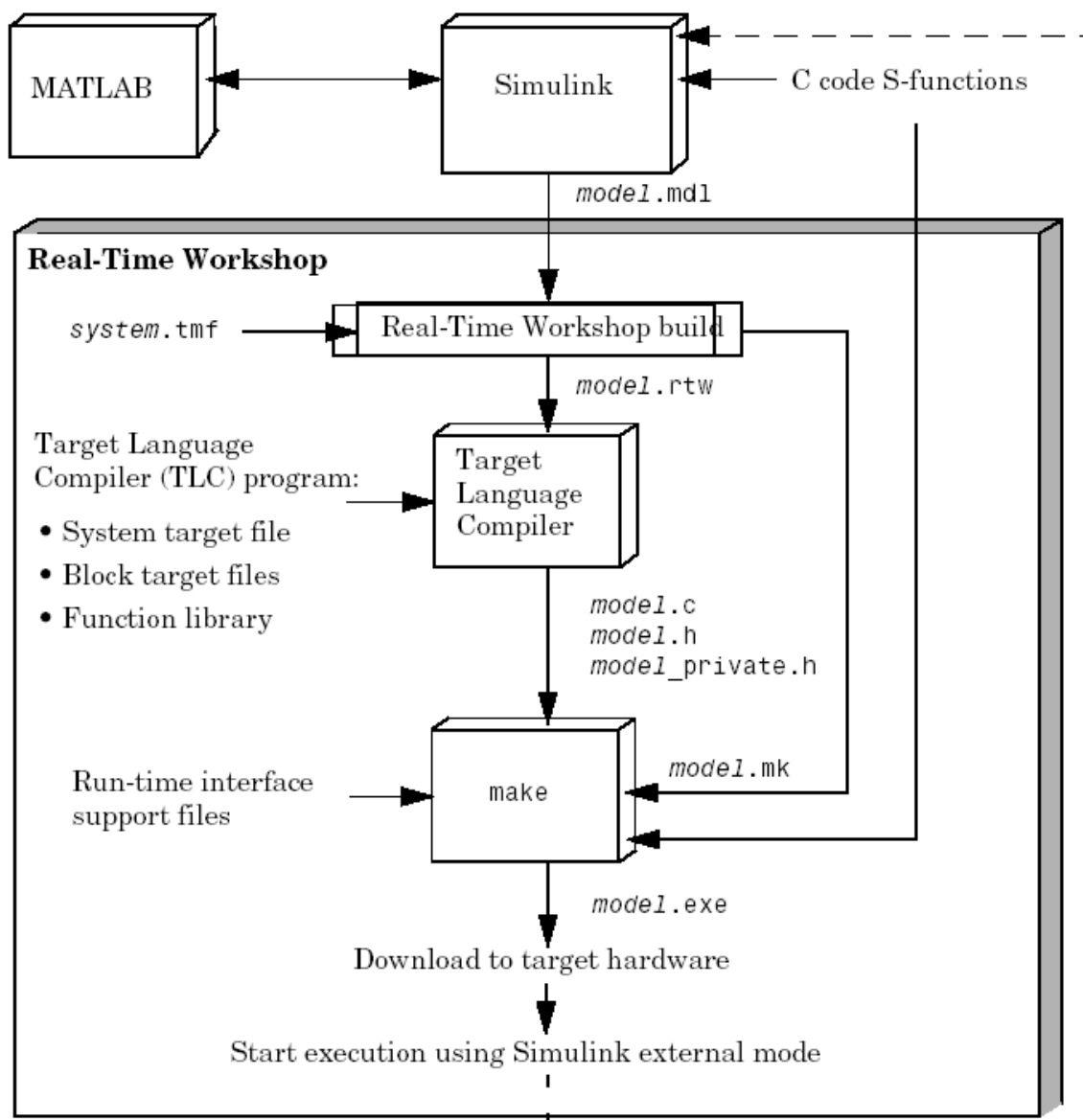


图 1.3.1 RTW 结构图

Real-Time Workshop 的仿真流程可进一步概括为图 1.3.2 所示。

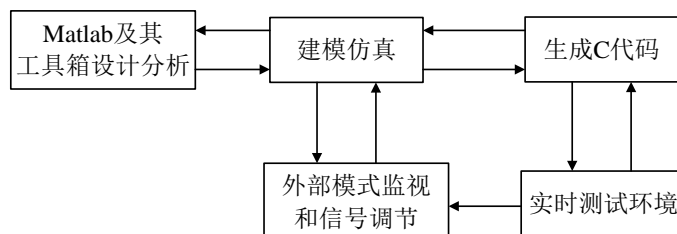


图 1.3.2 RTW 半实物仿真流程图

RTW 半实物仿真示例

如图 1.3.3 所示，建立系统仿真模型。仿真前要先利用 build 命令对目标进行编译，

成功后与目标进行连接（connect to target），运行仿真即可，结果如图 1.3.4 所示。

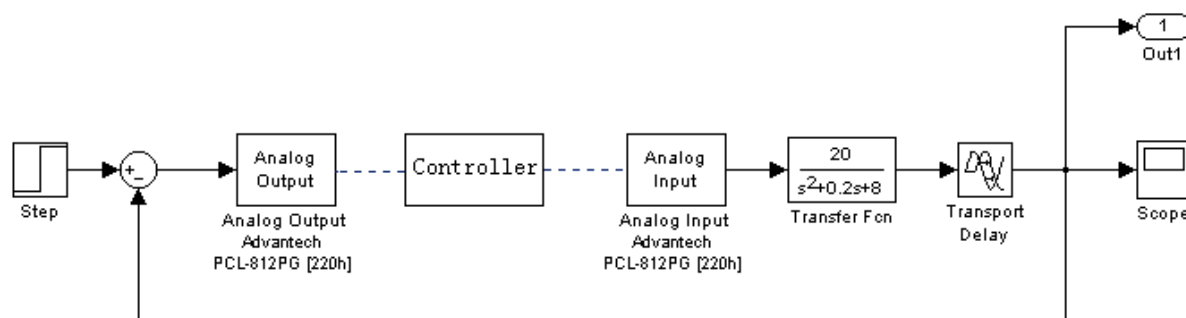


图 1.3.3 系统仿真模型

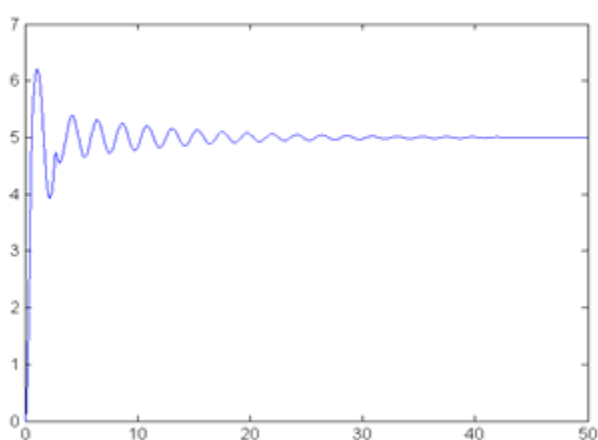





图 1.3.4 仿真结果

3.2 实验系统软件使用

硬件平台为普通 PC 机，I/O 接口板为 PCI 数据采集板，软件平台使用 Microsoft Windows、Matlab 2006a（包括 Matlab、Simulink、Real-Time Workshop 和 Real-Time Windows Target）、Visual C++ 6.0 等。

这里实验系统软件指基本实验内容。步骤如下：

1. 双击桌面 MATLAB 图标打开软件，在 MATLAB 的命令提示符后输入“autolab”命令执行，即可打开实验软件系统。
2. 软件界面上方进行实验项目的选择，选择相应的实验后，在左侧有相应的实验内容和要求，分别为：实验内容、实验原理、实验步骤、实验报告和设备、实验模型几个部分。
3. 选择“实验模型”后将打开一个实验模型界面，可进行仿真和实验。在工具栏中选择“Normal”方式，点击运行可进行理论仿真；选择“External”方式，可进行外部电

路实时仿真，首先选择  图标“Incremental build”进行编译，然后选择  图标“Connect To Target”连接目标，最后选择  图标“Start real-time code”执行。**注意：**在实验过程中如果更改系统模型则必须进行重新编译，更改外部电路则不需要重新编译，只进行连接和运行即可！

4. 从“Scope”窗口中观测实验结果，在 MATLAB 的“workspace”中可得到实验的数据。可将实验数据导出以“.mat”类型文件存盘。但是需要注意每次实验完成后应及时对数据进行保存，否则，下次实验的数据将会覆盖原数据！

3.3 研究性实验方法

1. 建立 Simulink 的系统模型图（可参照给定的模型图建立）。在“Simulink Library Browser”中找到“My Blockset”打开，选择“Real-time Windows Target”中的“PCI-2013”，可看到四个模块，分别为“A/D、D/A、DI、DO”，拖动相应的模块到模型中。模型其他部分自行建立，此处不再叙述。相关参数设置由实验指导教师进行指导。

2. 完成相应配置后，可对模型进行编译、连接、执行等步骤的操作，设置采样时间的时候应保证 A/D 和 D/A 的采样时间一致。

第二部分 自动控制原理实验指导

实验一 时域响应测试与性能分析实验

一、实验目的

1. 精通在电子模拟机上建立典型环节系统模型的方法。
2. 掌握阶跃响应的测试方法。
3. 理解一、二阶系统阶跃响应及其性能指标与系统参数之间的关系。

二、实验内容

1. 建立一阶系统的电子模型，观测并记录不同时间常数 T 时的跃响应曲线，测定其过渡过程时间 T_s ，填写数据表格 2.1.1。

表 2.1.1 一阶系统参数指标

T	0.25	0.5	1.0
C			
R_2			
T_s 实测			
T_s 理论			
阶跃响应曲线			

2. 建立二阶欠阻尼系统的电子模型，观测并记录不同阻尼比 ζ 时的跃响应曲线，测定其超调量 $\sigma\%$ 及过渡过程时间 T_s ，填写数据表格 2.1.2。

表 2.1.2 二阶系统参数指标

ζ	0.25	0.5	0.707	1.0
C_2				
R_4				
$\sigma\%$ 实测				
$\sigma\%$ 理论				
T_s 实测				
T_s 理论				
阶跃响应曲线				

三、实验设备

实验系统如图 2.1.1 所示，包括：

1. 数字计算机
2. 电子模拟机
3. 万用表
4. 测试导线



图 2.1.1 混合仿真系统实物图

四、预习要求

1. 认真阅读《自动控制原理实验 A（1）实验指导书》概述部分，了解课程重要性与基本实验方式。
2. 自行学习实验指导书实验系统操作指导部分内容，掌握实验系统组成与基本操作方法。
3. 设计具有不同时间常数 T 的一阶系统模拟电路图，选定所用运放。学生每次实验前需要认真复习自动控制原理、电路等相关知识，并对当次实验进行预习，完成预习思考、模拟电路设计、控制器设计等相关内容。
4. 设计具有不同阻尼比 ζ 的二阶欠阻尼系统模拟电路图，选定所用运放。
5. 思考一、二阶系统不同参数对其阶跃响应与性能指标的影响。

五、实验原理

1. 一阶系统

系统传递函数为：
$$\phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts + 1}$$

模拟运算电路如图 2.1.2 所示：

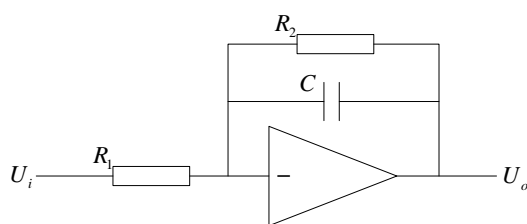


图 2.1.2 一阶系统模拟电路图

由图 2.1.2 得

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{\frac{R_2}{R_1}}{R_2Cs + 1} = \frac{K}{Ts + 1}$$

在实验当中始终取 $R_2 = R_1$ ，则 $K = 1$ ， $T = R_2C$

取不同的时间常数 T 分别为：0.25、0.5、1.0。

记录不同时间常数下阶跃响应曲线，测量并纪录其过渡过程时间 T_s ，将参数及指标填在表 2.1.1 内。

2. 二阶系统

系统传递函数为： $\phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ 。令 $\omega_n = 1$ 弧度/秒，则系统结构如图

2.1.3 所示：

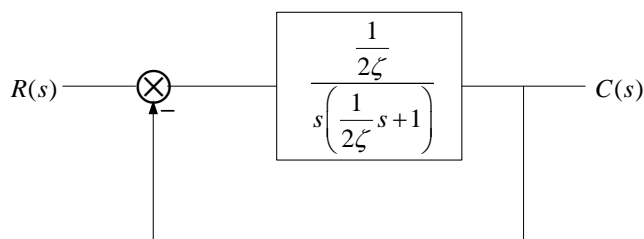


图 2.1.3 二阶系统结构图

根据结构图，建立的二阶系统模拟线路如图 2.1.4 所示：

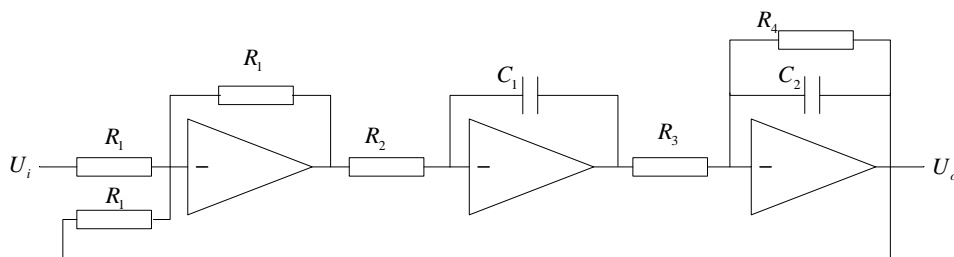


图 2.1.4 二阶系统模拟电路图

$$\text{取 } R_2C_1=1, R_3C_2=1, \text{ 则 } \frac{R_4}{R_3}=R_4C_2=\frac{1}{2\zeta}, \zeta=\frac{1}{2R_4C_2}$$

ζ 取不同的值: 0.25、0.5、0.707、1.0, 观察并记录阶跃响应曲线, 测量超调量 $\sigma\%$, 计算过渡过程时间 T_s , 将参数及各项指标填入表 2.1.2 内。

以上实验, 配置参数时可供选择的电阻 R 值有 100K Ω , 1M Ω , 470K Ω (可调), 2.2M Ω (可调), 电容 C 值有 1 μ f, 10 μ f。

六、实验步骤

1. 熟悉 HHMN-1 型电子模拟机的使用方法, 将各运算放大器接成比例器, 通电调零。
2. 断开电源, 按照实验说明书上的条件和要求, 计算电阻和电容的取值, 按照模拟线路图搭接线路。
3. 谨慎连接输入、输出端口, 不可接错(参见注意事项 1)。线路接好后, 经教师检查后再通电。
4. 在 Windows 桌面用鼠标双击“MATLAB”图标后进入, 在命令行处键入“autolab”进入实验软件系统。
5. 在系统菜单中选择实验项目, 选择“实验一”, 在窗口左侧选择“实验模型”, 其它步骤察看概述 3.2 节内容。
6. 观测实验结果, 记录实验数据(参见注意事项 2), 及时绘制实验结果图形(参见注意事项 3), 填写实验数据表格, 完成实验报告。
7. 研究性实验方法。

实验者可自行确定典型环节传递函数, 并建立系统的 SIMULINK 模型, 验证自动控制理论相关的理论知识。实现步骤可察看概述 3.3 节内容。

七、注意事项

1. 谨慎连接输入、输出端口, 将 D/A1 与系统输入端 U_i 连接, 将 A/D1 与系统输出端 U_o 连接。
2. 实验数据分为计算机数值仿真和半实物实时仿真两种, 分被保存在 workspace 中, 其中 input、output、time 为数值仿真数据, rt_input、rt_output、rt_time 为实时仿真数据。本次实验课上要求同学完成半实物实时仿真, 相关设置可察看概述 3.2 节内容。

3. 每个实验完成后都应及时进行数据的记录，包括要保存实验结果图形、数据、性能指标，下一次实验的数据将会把上一次实验数据覆盖。

八、实验报告要求

实验报告中应包括以下内容：

1. 画出系统模拟运算电路图，并标出电阻、电容的取值。
2. 画出各种情况下的系统阶跃响应曲线，同时填写实验数据表格。
3. 分析实验结果并与理论计算值进行比较，分析误差及其产生的原因。
4. 比较不同情况下系统阶跃响应曲线及其性能指标，分析一、二阶系统阶跃响应及其性能指标与系统参数之间的关系。

实验报告模板可参照附件 1。

九、课后思考题

1. 查阅相关资料，思考调用 matlab 指令 `stepspecs` 计算系统阶跃响应性能指标的原理，理解系统相关阶跃响应性能指标的内涵。
2. 查阅文献，辅以数值仿真，思考二阶系统阶跃响应及其性能指标与系统自然角频率之间的关系。

十、参考资料

1. 自动控制原理，程鹏主编，高等教育出版社，2010。
2. 自动控制原理，胡寿松主编，科学出版社，2007。
3. Modern Control Engineering (Fifth Edition), Katsuhiko Ogata, Prentice Hall, 2011.
4. Modern Control Systems (Ninth Edition), Richard C. Dorf 等, Pearson Education, 2004.

实验二 高阶系统性能分析与数值仿真实验

一、实验目的

通过本实验掌握利用四阶龙格—库塔法进行控制系统数字仿真的方法，并分析系统参数改变对系统性能的影响。

二、实验内容

1、高阶系统稳定性分析

已知系统结构图如图 2.4.1 所示。

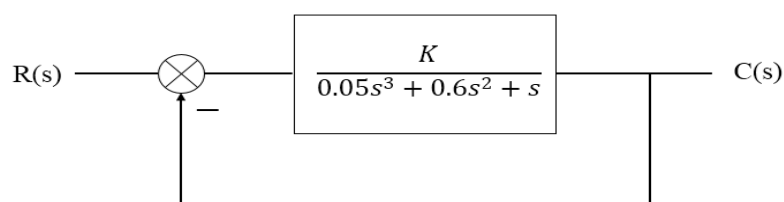
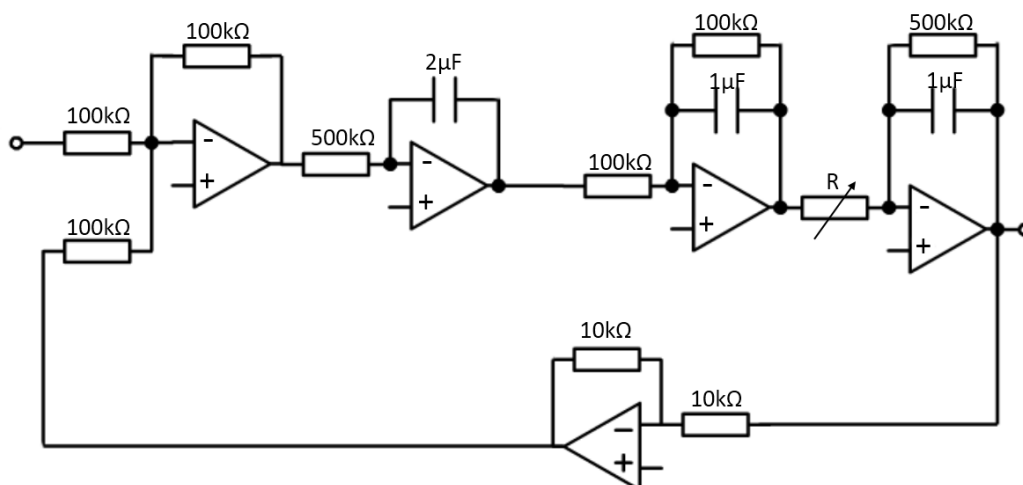


图 2.4.1 系统结构图 1

计算闭环系统的临界稳定增益 K 。分别采用劳斯（Routh）判据和根轨迹法求解。

分别取 3 个 K 值，使系统产生衰减振荡、等幅振荡、发散振荡。（采用 Matlab 进行仿真，得到三种情况下的响应曲线）

搭建实验电路实现上述传递函数。



开环增益 $K=500\text{k}\Omega/R$ ，调整可变电阻 R 可以改变 K 值。

2、控制系统数值仿真

已知系统结构图如图 2.4.2 所示。

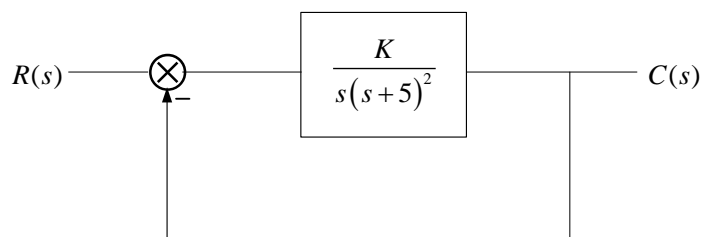


图 2.4.2 系统结构图 2

若输入为单位阶跃信号，计算当超调量分别取为 5%、25% 和 50% 时 K 的取值（用主导极点方法估算），并根据确定的 K 值在计算机上进行数字仿真。

三、实验设备

1. 数字计算机
2. 模拟机

四、预习要求

1. 掌握高阶系统时域分析方法。
2. 学习高阶系统闭环主导极点及其动态性能分析方法。
3. 学习四阶龙格—库塔法原理。

五、实验原理

1. 四阶—龙格库塔法

若一阶微分方程如下：

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = f(t, y(t)) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (2-4-1)$$

则在 $t_{n+1} (t_{n+1} > t_0)$ 处， $y(t_{n+1})$ 的近似值为

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2-4-2)$$

式中：

$$\begin{aligned}
 h &= t_{n+1} - t_n \\
 k_1 &= f(t_n, y_n) \\
 k_2 &= f(t_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_1) \\
 k_3 &= f(t_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}hk_2) \\
 k_4 &= f(t_n + h, y_n + hk_3) \\
 n &= 0, 1, 2, \dots
 \end{aligned}$$

如果微分方程是如下形式的向量微分方程：

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = F(t, X(t), u(t)) \\ X(0) = X_0 \end{cases} \quad (2-4-3)$$

其中， $X(t)$ 是 m 维向量， t 和 $u(t)$ 均为标量，则在 $t_{n+1}(t_{n+1} > t_0)$ 处， $X(t_{n+1})$ 的近似值为：

$$X_{n+1} = X_n + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (2-4-4)$$

式中：

$$\begin{aligned}
 h &= t_{n+1} - t_n \\
 K_1 &= F(t_n, X_n, u(t_n)) \\
 K_2 &= F(t_n + \frac{h}{2}, X_n + \frac{h}{2}K_1, u(t_n)) \\
 K_3 &= F(t_n + \frac{h}{2}, X_n + \frac{h}{2}K_2, u(t_n)) \\
 K_4 &= F(t_n + h, X_n + hK_3, u(t_n)) \\
 n &= 0, 1, 2, \dots
 \end{aligned}$$

2. 控制系统仿真

设系统的闭环传递函数为：

$$\varphi(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{c_1 s^{n-1} + c_2 s^{n-2} + \dots + c_{n-1} s + c_n}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2-4-5)$$

引入中间变量 $v(s)$ ，则上式可化为 $\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{y(s)}{v(s)} \cdot \frac{v(s)}{u(s)}$ 。

令：

$$\frac{v(s)}{u(s)} = \frac{1}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2-4-6)$$

$$\frac{y(s)}{v(s)} = c_1 s^{n-1} + c_2 s^{n-2} + \cdots + c_{n-1} s + c_n \quad (2-4-7)$$

由以上两式可得如下两个微分方程

$$v^{(n)}(t) + a_1 v^{(n-1)}(t) + \cdots + a_{n-1} \dot{v}(t) + a_n v(t) = u(t) \quad (2-4-8)$$

$$y(t) = c_1 v^{(n-1)}(t) + c_2 v^{(n-2)}(t) + \cdots + c_{n-1} \dot{v}(t) + c_n v(t) \quad (2-4-9)$$

令：

$$v^{(n-1)}(0) = v^{(n-2)}(0) = \cdots = \dot{v}(0) = v(0) = 0$$

$$x_1(t) = v(t), x_2(t) = \dot{v}(t), \cdots, x_n(t) = v^{(n-1)}(t)$$

则式(2-4-8)可化为如下一阶微分方程组：

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) = x_n(t) \\ \dot{x}_n(t) = -a_n x_1(t) - a_{n-1} x_2(t) - \cdots - a_1 x_n(t) + u(t) \end{cases} \quad (2-4-10)$$

式(2-4-9)可写成：

$$y(t) = c_n x_1(t) + c_{n-1} x_2(t) + \cdots + c_1 x_n(t) \quad (2-4-11)$$

方程(2-4-10)和(2-4-11)可写成如下向量形式：

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + bu(t) \\ y(t) = cX(t) \\ X(0) = 0 \end{cases} \quad (2-4-10)$$

这里 $X(t)$ 为 n 维列向量， $u(t)$ 为标量， A 为 $n \times n$ 常数矩阵， b 为 n 维列向量， c 为 n 维行向量，并分别具有如下形式：

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix} \quad c = [c_n, c_{n-1}, \cdots, c_1]$$

对比式(2-4-3)可得， $F(t, X(t), u(t)) = AX(t) + bu(t)$

六、实验步骤

高阶系统稳定性分析

1. 分别采用劳斯判据和绘制根轨迹方法计算 K 值（要写出计算过程）；
2. 根据结果选取 3 种情况下的 K 值，代入系统进行 Matlab 仿真；
3. 将三种情况的响应曲线记录保存。

控制系统数值仿真

1. 绘制系统根轨迹。
2. 参照系统根轨迹，分析系统性能，并确定主导极点，适当简化系统。
3. 计算系统阶跃响应超调量分别取为 5%、25% 和 50% 时 K 的取值。
4. 根据图 2.4.2，编写数值仿真程序。源程序代码附在报告里，并进行必要的注释。

若选取计算步长为 h ，输出打印步长为 mh （ m 为正整数），共计算 N 步，则程序框图如下：

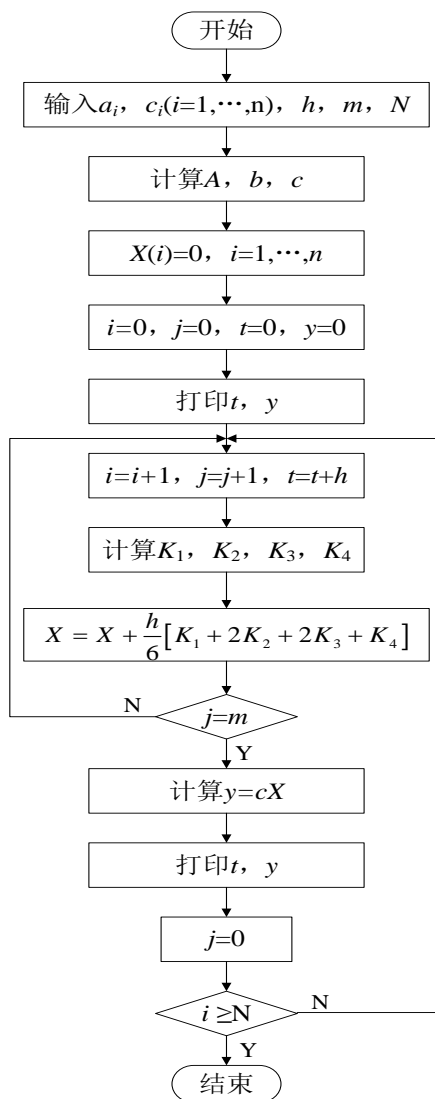


图 2.4.1 程序框图

5. 根据确定的 K 值在计算机上进行数字仿真，绘制不同 K 值下的系统阶跃响应曲线。

6. 分析系统阶跃响应曲线，计算系统性能指标，与设计要求进行比较。

七、注意事项

1. 本次实验课上要求同学进行数值仿真，相关设置可察看概述 3.2 节内容。
2. 每个实验完成后都应及时进行数据的记录，包括要保存实验结果图形、数据、性能指标，下一次实验的数据将会把上一次实验数据覆盖。

八、实验报告要求

1. 写明计算当超调量分别取为 5%、25% 和 50% 时 K 计算过程。
2. 记录系统产生衰减振荡、等幅振荡、发散振荡情况下的响应曲线。
3. 编写四阶龙格-库塔法仿真程序，并进行必要的注释。
4. 写明 K 值的计算过程，绘制不同 K 值下的系统阶跃响应曲线，并计算系统性能指标，同设计要求进行比较。

实验报告模板可参照附件 1。

九、课后思考题

1. 学习 Simulink 建模仿真方法，思考本次实验采用 Simulink 仿真如何实现。
2. 尝试利用频域分析法设计、计算传递系数 K 。

十、参考资料

1. 自动控制原理，程鹏主编，高等教育出版社，2010。
2. 自动控制原理，胡寿松主编，科学出版社，2007。
3. Modern Control Engineering (Fifth Edition), Katsuhiko Ogata, Prentice Hall, 2011.
4. Modern Control Systems (Ninth Edition), Richard C. Dorf 等, Pearson Education, 2004.

实验三 频率特性测试与频域分析法建模实验

一、实验目的

1. 掌握频率特性的测试原理及方法。
2. 学习根据所测定出的系统的频率特性，确定系统传递函数的方法。

二、实验内容

1. 测定给定环节的频率特性。

系统模拟电路图及系统结构图分别如图 2.2.1 及图 2.2.2。

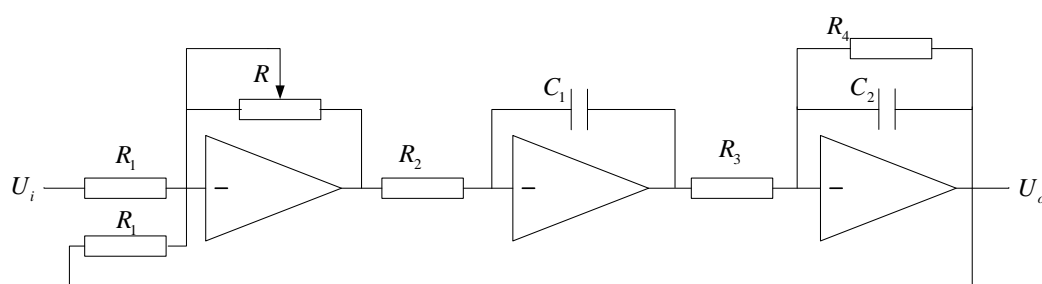


图 2.2.1 系统模拟电路图

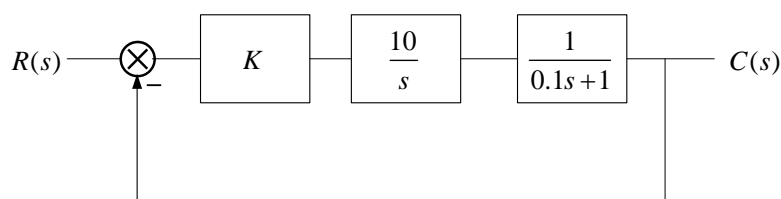


图 2.2.2 系统模拟电路图

系统传递函数为（以下内容 3 选 2）：

$$\text{取 } R = R_1, \text{ 则 } K=1, G(s) = \frac{100}{s^2 + 10s + 100}$$

$$\text{取 } R = 2R_1, \text{ 则 } K=2, G(s) = \frac{200}{s^2 + 10s + 200}$$

$$\text{取 } R = 5R_1, \text{ 则 } K=5, G(s) = \frac{500}{s^2 + 10s + 500}$$

若正弦输入信号为 $U_i(t) = A_1 \sin(\omega t)$ ，则当输出达到稳态时，其输出信号为 $U_o(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi)$ 。改变输入信号频率 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 值，便可测得二组 A_2/A_1 和 φ 随 f （或 ω ）变化的数值，这个变化规律就是系统的幅频特性和相频特性。

2. 根据测定的系统频率特性，确定系统的传递函数。

三、实验设备

实验系统如图 2.2.3 所示，包括：

1. 数字计算机
2. 电子模拟机
3. 万用表
4. 测试导线



图 2.2.3 混合仿真系统实物图

四、预习要求

1. 设计具有不同前向通道增益 K 的系统模拟电路图，并选定所用运放。
2. 思考测定系统频率特性数据的不同方法。
3. 思考系统转折频率的含义，并确定其大致范围。

五、实验原理

1. 幅频特性即测量输入与输出信号幅值 A_1 及 A_2 ，然后计算其比值 A_2/A_1 。
2. 实验采用“李沙育图形”法进行相频特性的测试。以下简单介绍一下这种测试方法的原理。

设有两个正弦信号：

$$X(\omega t) = X_m \sin(\omega t)$$

$$Y(\omega t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi)$$

若以 $X(\omega t)$ 为横轴， $Y(\omega t)$ 为纵轴，而以 ω 作为参变量，则随着 ωt 的变化， $X(\omega t)$ 和

$Y(\omega t)$ 所确定的点的轨迹，将在 X - Y 平面上描绘出一条封闭的曲线。这个图形就是物理学上所称的“李沙育图形”，如图 2.2.4 所示。

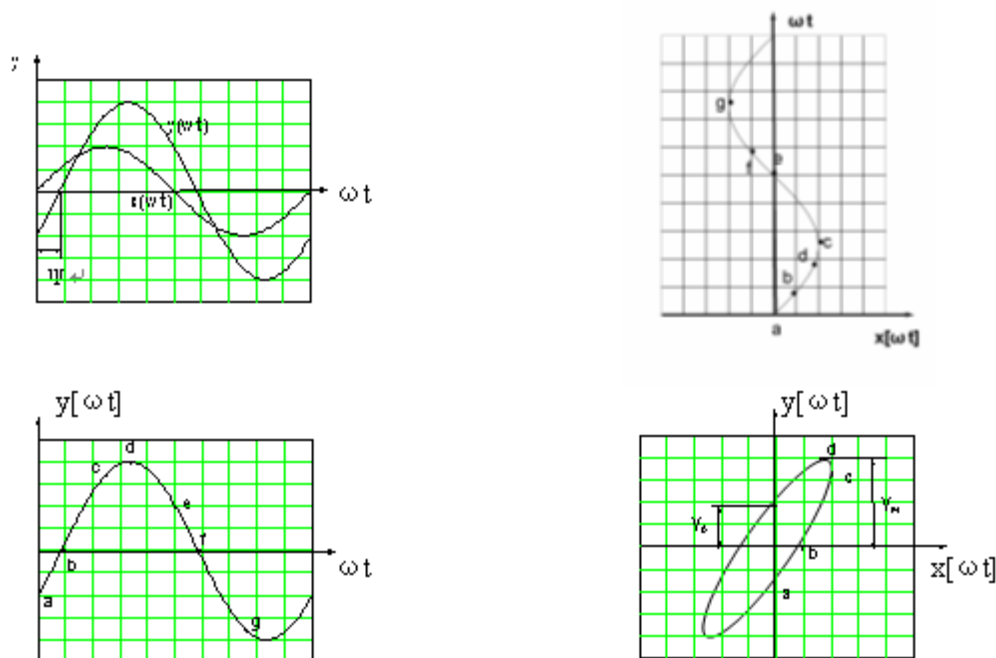


图 2.2.4 李沙育图形

3. 相位差角 φ 的求法:

对于 $X(\omega t) = X_m \sin(\omega t)$ (及 $Y(\omega t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi)$)，当 $\omega t = 0$ 时，有 $X(0) = 0$ ， $Y(0) = Y_0 = Y_m \sin(\varphi)$ ；即 $\varphi = \arcsin(Y_0/Y_m)$ 。显然，仅当 $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ 时，上式成立。

4. 记录实验结果数据填写表 2.2.1。

表 2.2.1 实验结果数据表

编号	1	2	3	...	10
ω					
A_2/A_1					
Y_0/Y_m					
φ					

六、实验步骤

1. 熟悉 HHMN-1 型电子模拟机的使用方法。将各运算放大器接成比例器，通电调零。

2. 断开电源，按照系统结构图和系统传递函数计算电阻和电容的取值，并按照模拟线路图搭接线路。

3. 谨慎连接输入、输出端口，不可接错（参见注意事项 1）。线路接好后，经教师检查后再通电。

4. 在 Windows XP 桌面用鼠标双击“MATLAB”图标后进入，在命令行处键入“autolab”进入实验软件系统。

5. 在系统菜单中选择实验项目，选择“实验二”，在窗口左侧选择“实验模型”，其它步骤察看概述 3.2 节内容。

6. 观测实验结果，记录实验数据（参见注意事项 2），及时绘制实验结果图形（参见注意事项 3），填写实验数据表格，完成实验报告。采用示波器（Scope）观察“输入”与“输出”波形，测定输出和输入的正弦曲线幅值。采用“XY Graph”观测李沙育图形。

7. 研究性实验方法。

实验者可自行确定待测系统传递函数，并建立系统的 SIMULINK 模型，验证自动控制理论相关的理论知识。实现步骤可查看概述 3.3 节内容。

七、注意事项

1. 谨慎连接输入、输出端口，将 D/A1 与系统输入端 U_i 连接，将 A/D1 与系统输出端 U_o 连接。

2. 实验数据分为计算机数值仿真和半实物实时仿真两种，分被保存在 workspace 中，其中 input、output、time 为数值仿真数据，rt_input、rt_output、rt_time 为实时仿真数据。本次实验课上要求同学完成半实物实时仿真，相关设置可察看概述 3.2 节内容。

3. 每个实验完成后都应及时进行数据的记录，包括要保存实验结果图形、数据、性能指标，下一次实验的数据将会把上一次实验数据覆盖。

八、实验报告要求

实验报告中应包括以下内容：

1. 画出系统模拟运算电路图，并标出电阻、电容的取值。
2. 将测定的系统频率特性数据填写在实验数据表格中。
3. 根据系统频率特性数据，绘制频率特性曲线。
4. 根据各自绘制的频率特性曲线，确定系统传递函数，要求写清详细过程

5. 分析实验结果并与理论计算值进行比较, 分析误差及其产生的原因。

实验报告模板可参照附件 1。

九、课后思考题

1. 思考二阶系统转折频率与系统参数之间的关系。

2. 思考频率特性测试在工程实践中的应用。

十、参考资料

1. 自动控制原理, 程鹏主编, 高等教育出版社, 2010。

2. 自动控制原理, 胡寿松主编, 科学出版社, 2007。

3. Modern Control Engineering (Fifth Edition), Katsuhiko Ogata, Prentice Hall, 2011.

4. Modern Control Systems (Ninth Edition), Richard C. Dorf 等, Pearson Education, 2004.

实验四 串联校正设计实验

一、实验目的

1. 了解和掌握串联校正的分析和设计方法。
2. 研究串联校正环节对系统稳定性及过渡过程的影响。

二、实验内容

1. 为开环传递函数为 $G_0(s) = \frac{4}{s(s+1)}$ 的单位负反馈系统设计串联超前校正装置，要求相角裕度 $\gamma \geq 45^\circ$ ，并进行半实物实时仿真验证。
2. 为开环传递函数为 $G_0(s) = \frac{4}{s(s+1)}$ 的单位负反馈系统设计串联滞后校正装置，要求相角裕度 $\gamma \geq 45^\circ$ ，并进行半实物实时仿真验证。
3. PID 控制器设计。针对给定系统，设计 PID 控制器，满足指标要求。
系统传递函数为 $G(s) = \frac{s+4}{(s+3)(s+2)(s+1)(s+1)(s+1)}$ ，要求设计 PID 控制器，使控制系统的性能达到 $\sigma\% \leq 10\%$ ， $t_s < 8s$ 。

三、实验设备



图 2.3.1 混合仿真系统实物图

实验系统如图 2.3.1 所示，包括：

1. 数字计算机
2. 电子模拟机
3. 万用表
4. 测试导线

四、预习要求

1. 学习、掌握串联校正的分析与设计方法。
2. 设计被控对象模拟电路图，选定所用运放。
3. 根据实验内容要求，设计系统超前校正、滞后校正装置。
4. 根据要求设计 PID 控制器，采用 Matlab 仿真，分析结果是否满足要求。

五、实验原理

1. 系统结构图如图 2.3.2 所示。

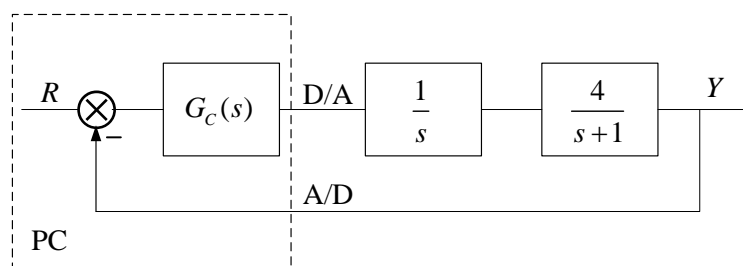


图 2.3.2 系统结构图

其中 $G_C(s)$ 为校正环节，可放置在系统模型中来实现，也可使用模拟电路的方式由模拟机实现。

2. 系统模拟电路如图 2.3.3 所示。

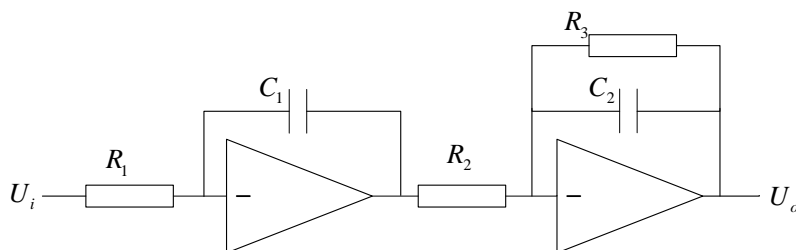


图 2.3.3 系统模拟电路图

3. 未加校正时， $G_C(s)=1$ 。
4. 加串联超前校正时， $G_C(s)=\frac{aTs+1}{Ts+1}$ ($a>1$ 。可参考 $a=2.44$ ， $T=0.26$ ，则

$$G_c(s) = \frac{0.63s+1}{0.26s+1}。$$

5. 加串联滞后校正时, $G_c(s) = \frac{bTs+1}{Ts+1}$ ($0 < b < 1$)。自行设计参数。

6. 采用 Ziegler-Nichols 法或衰减曲线或实践法整定 PID 参数, 使结果达到指标要求。

PID (比例-积分-微分) 控制器是工业控制中最常见的一种控制装置, 被广泛应用于化工、冶金、机械、热工、电力等工业控制系统中。比例作用提供基本的反馈控制, 积分作用用于消除稳态误差, 微分作用可预测将来的误差变化以减小动态偏差。PID 控制器特别适用于过程的动态特性是线性的系统。PID 控制器的参数整定是指针对具体的控制对象和控制要求调整控制器参数求取控制器质量最好的控制器参数值。具体地, 就是确定最合适的比例系数、积分时间系数和微分时间系数。

$$G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

可以采取不同的方法进行参数整定:

(1) 实践整定法

先用经验公式法初定 PID 参数, 然后边微调各参数边观察控制系统响应变化, 直到得到理想的控制性能。

具体步骤:

- 单独比例控制。观察比例环节对系统性能影响, 注意到在 0~6 期间, 振荡逐渐加剧直到系统接近等幅振荡。
- 调节比例环节至基本出现两个波, 前后高低比接近 4: 1。
- 加入积分环节, 观察积分环节参数对系统的影响, 保证系统稳定, 稳态误差为零, 振荡较小。
- 加入微分环节进一步减小超调量。
- 微调各参数。

选择较好的数据作为最终调节参数。

(2) Ziegler-Nichols 法

Ziegler-Nichols 经验整定是基于受控对象是带有延迟的一阶惯性模型提出的。如果控制对象中既不包含积分器, 又不包含主导共轭复数极点, 此时曲线如一条 S 形, 通过实验建模也可近似为一阶惯性带延迟的系统模型。如

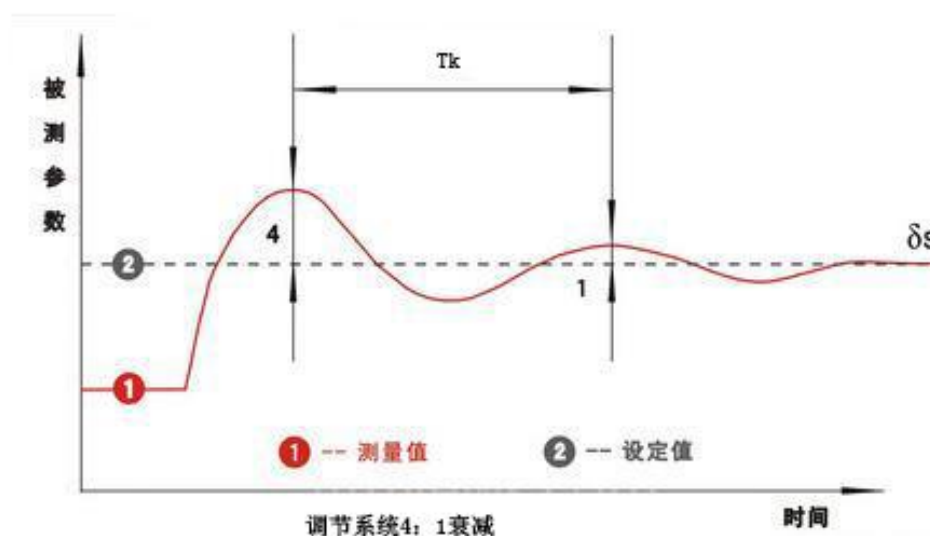
$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

Ziegler-Nichols 法则给出了 PID 控制器的 K_p , T_i , T_d 整定参数, 见下表

控制器类型	PID 控制器参数		
	K_p	T_i	T_d
P	$T/(K^* \tau)$	∞	0
PI	$0.9T/(K^* \tau)$	3τ	0
PID	$1.2T/(K^* \tau)$	2τ	0.5τ

(3) 衰减振荡法

使积分环节和微分环节不工作, 调整比例增益 K_p , 从 1 开始, 逐渐增大直到衰减振荡响应的衰减比为 4: 1, 记录此时的比例系数 K_1 , 振荡周期 T_k 。如下图。



计算此时的比例度 δ_k , $\delta_k = 1/K_1$ 。再根据下表计算积分时间和微分时间。

衰减振荡法 PID 参数整定表

控制率	比例度	积分时间 T_i	微分时间 T_d
P	δ_k	∞	0
PI	$1.2\delta_k$	$0.5T_k$	0
PID	$0.8\delta_k$	$0.3T_k$	$0.1T_k$

具体步骤:

- a. 给系统加入阶跃信号, 观察响应波形, 可知系统的稳态误差较大。
- b. 单独调整比例参数, 从 1 开始逐渐增大, 直至出现所谓的 4: 1 的衰减比。
- c. 记下此时比例度 δ_k , T_k 。根据经验公式换算 PID 参数。

P 控制系数: K_p ;

PI 控制系数: K_p , T_i ;

PID 控制系数: K_p , T_i , T_d

六、实验步骤

1. 熟悉 HHMN-1 型电子模拟机的使用方法。将各运算放大器接成比例器, 通电调零。断开电源, 按照系统结构图和系统传递函数计算电阻和电容的取值, 并按照模拟线路图搭接线路。

3. 谨慎连接输入、输出端口, 不可接错 (参见注意事项 1)。线路接好后, 经教师检查后再通电。

3. 在 Windows XP 桌面用鼠标双击 “MATLAB” 图标后进入, 在命令行处键入 “autolab” 进入实验软件系统。

4. 在系统菜单中选择实验项目, 选择 “实验三”, 在窗口左侧选择 “实验模型”, 其它步骤察看概述 3.2 节内容。

5. 分别完成不加校正、加入超前校正、加入滞后校正的实验。在系统模型上的 “Manual Switch” 处可设置系统是否加入校正环节, 在 “ $G_c(s)$ ” 处可设置校正环节的传递函数。

6. 绘制以上三种情况时系统的波特图。

7. 采用示波器 “Scope” 观察阶跃响应曲线。观测试验结果, 记录实验数据, 绘制实验结果图形, 完成实验报告。

8. 研究性实验方法。

实验者可自行确定系统传递函数, 同时设计校正环节, 并建立系统的 SIMULINK 模型, 验证自动控制理论相关的理论知识。实现步骤可查看概述 3.3 节内容。

9. 根据设计指标要求, 设计 PID 控制器并进行参数整定。采用 Matlab 仿真的方式测试未加 PID 控制和加入 PID 控制后两种情况下的响应曲线, 并计算超调量和调节时间。

七、注意事项

1. 谨慎连接输入、输出端口, 将 D/A1 与系统输入端 U_i 连接, 将 A/D1 与系统输出端 U_o 连接。

2. 实验数据分为计算机数值仿真和半实物实时仿真两种, 分被保存在 workspace 中, 其中 input、output、time 为数值仿真数据, rt_input、rt_output、rt_time 为实时仿真数据。本次实验课上要求同学完成半实物实时仿真, 相关设置可察看概述 3.2 节内容。

3. 每个实验完成后都应及时进行数据的记录, 包括要保存实验结果图形、数据、性能指标, 下一次实验的数据将会把上一次实验数据覆盖。

八、实验报告要求

实验报告中应包括以下内容:

1. 设计超前校正环节和滞后校正环节, 写出校正环节的传递函数。
2. 画出系统模拟运算电路图, 并标出电阻、电容的取值。
3. 画出系统不加校正、加超前校正、加滞后校正的阶跃响应曲线, 计算系统性能指标。
4. 画出系统不加校正、加超前校正、加滞后校正的波特图, 计算截止频率和稳定裕度。
5. 写出 PID 整定参数的过程, 记录仿真响应曲线并说明是否符合设计要求。
6. 分析实验数据, 并分别从时域和频域两个角度, 总结分析校正环节对于系统稳定性和过渡过程的影响。

实验报告模板可参照附件 1。

九、课后思考题

1. 分析、总结不同校正环节的特点和对系统稳定性和过渡过程的影响。
2. 研究滞后-超前校正装置的设计方法。
3. 研究 PID 控制器参数整定方法。

十、参考资料



1. 自动控制原理，程鹏主编，高等教育出版社，2010。
2. 自动控制原理，胡寿松主编，科学出版社，2007。
3. Modern Control Engineering (Fifth Edition), Katsuhiko Ogata, Prentice Hall, 2011.
4. Modern Control Systems (Ninth Edition), Richard C. Dorf 等, Pearson Education, 2004.

实验五 控制系统测试、设计综合实验

一、实验目的

1. 了解丝杠系统的组成及原理。
2. 熟悉控制系统设计的方法。
3. 掌握 PID 参数整定的方法。
4. 掌握控制系统建模方法及仿真分析。

二、实验内容

1. 通过对丝杠系统的理论分析，建立数学模型。

通过对丝杠系统的分析，建立系统的数学模型。为便于分析和设计，在建模过程中可对模型进行化简。

2. 根据建模结果采用 PID 控制对丝杠的位置进行控制，用 Matlab 进行仿真。

对 PID 参数进行整定，对丝杠的位置进行控制，要求位置精度不超过 1mm，响应尽量快，超调小或没有。采用 Matlab 进行仿真。

3. 采用 PLC、变频器等硬件设备对丝杠实物进行控制。

使用 PLC、变频器等硬件设备对丝杠实物进行位置控制，要求位置精度不超过 1mm。

三、实验设备

实验系统如图 2.5.1 所示，包括：

1. 数字计算机
2. 丝杠本体
3. PLC 控制系统
4. 路由器及网线

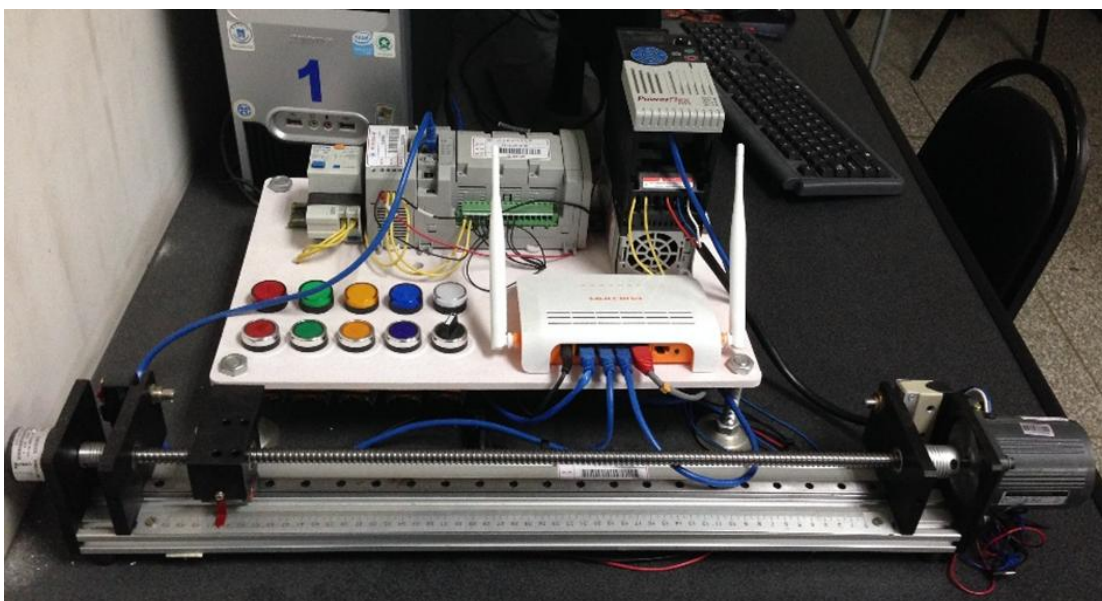


图 2.5.1 混合仿真系统实物图

四、预习要求

1. 建立丝杠系统的数学模型；
2. 采用 PID 对丝杠位置进行控制并用 Matlab 仿真；
3. 了解 PLC 的使用方法。

五、实验原理

1. 丝杠的结构与组成

滚珠丝杠系统机械传动机构由伺服电机、联轴器、滚珠丝杠副、两端支撑轴承、直线导轨副等部件组成，如图 2.5.2 所示。

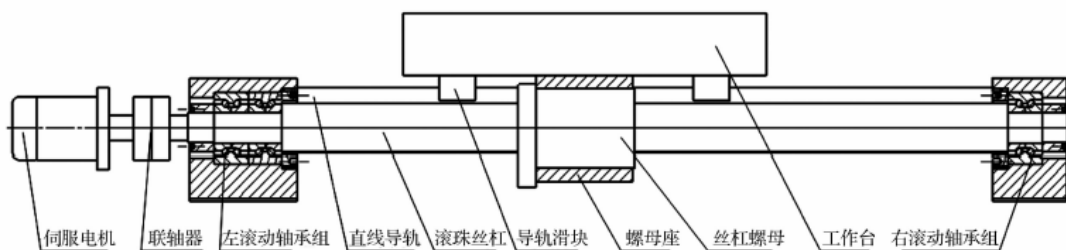


图 2.5.2 丝杠机械传动机构

2. 数学模型建立

由于系统联轴器连接部分、丝杠运动部分与轴承连接部分以及直线导轨部分的摩擦对丝杠整体运动的影响较大，建立的模型非常复杂。因此，为了简化模型复杂程度，方

便对模型的分析，建模过程只考虑粘性摩擦，而电机与丝杠端的连接视作刚性连接，丝杠各部分的转动惯量全部包含进电机的负载惯量中。

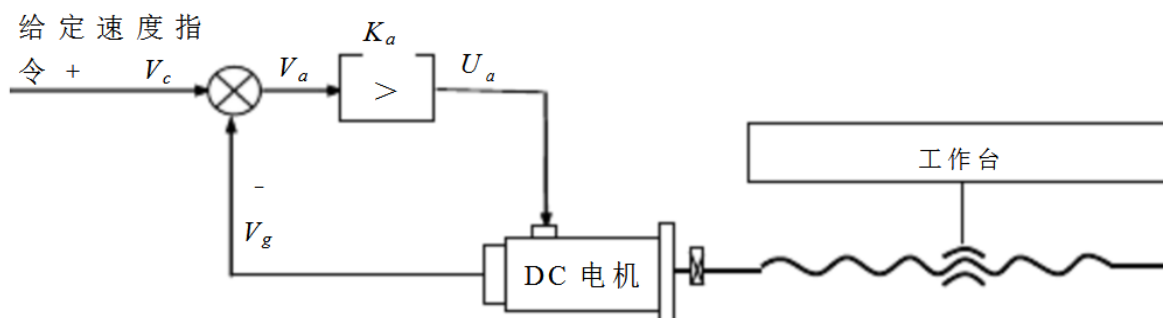


图 2.5.3 速度闭环系统

电枢控制直流电动机的工作是将电能转换为机械能，由电枢电压 U_a 在电枢回路中产生电枢电流 i_a ，该电流与激磁磁通相互作用产生电磁转矩 M_m ，拖动负载运动。直流伺服电机系统如图 2.5.4 所示。

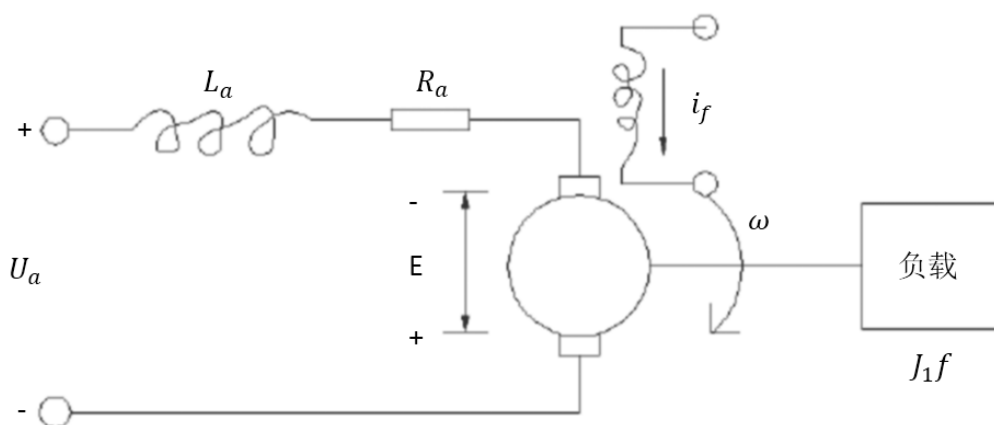


图 2.5.4 伺服电机系统

根据克希霍夫电压定律，电枢绕组中的电压平衡方程为

$$u_a(t) = i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t)$$

其中， L_a 和 R_a 分别为电枢绕组的电感和电阻。

当直流电动机的电枢转动时，在电枢绕组中有反电动势产生，一般与电动机的转速成正比。

$$E_a(t) = C_e \frac{d\theta_m}{dt} = C_e \omega_m(t)$$

其中， $E_a(t)$ 为反电势， C_e 为反电动势常数， $\omega_m(t)$ 为电动机转速。

电枢电流和磁场相互作用产生电磁转矩，一般电磁转矩与电枢电流成正比。

$$M_m(t) = C_m i_a(t)$$

$M_m(t)$ 为电磁转矩， $i_a(t)$ 为电枢电流， C_m 为转矩常数。

电磁转矩用以驱动负载并克服摩擦力矩，只考虑与速度成正比的粘性摩擦，在无负载情况下，直流电动机转矩平衡方程为

$$M_m(t) = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t)$$

J_m 为电机等效转动惯量， B_m 为等效阻尼系数。

这样可以建立无负载情况下，伺服直流环节的控制模型

$$\frac{\omega_m(s)}{U_a(s)} = \frac{C_m}{L_a J_m s^2 + (L_a B_m + J_m R_a) s + R_a B_m + C_e C_m}$$

所需参数如下：

电机电阻 $R_a = 21.8\Omega$;

电机电感 $L_a = 1.37mH$;

反电动势常数 $C_e = 0.0307V \cdot s/rad$;

转矩常数 $C_m = 0.0307Nm/A$;

电机转子转动惯量 $J = 5.68 \times 10^{-7} kg \cdot m^2$;

等效阻尼系数 $B_m = 0.0005$;

传动比 $i=29$;

电机轴等效转动惯量 $J_m = 5.71 \times 10^{-7} kg \cdot m^2$.

这样系统的开环传递函数为 $G(s) = \frac{\omega_m(s)}{U_a(s)} = \frac{0.1932}{1.51 \times 10^{-7} s^2 + 1.32 \times 10^{-4} s + 0.0082}$

若系统输入为给定滑块速度 V_c ，系统输出为电机转轴角速度 V_g ，则系统的闭环传递函数为：

$$\frac{V_g(s)}{V_c(s)} = \frac{3.8640}{1.51 \times 10^{-7} s^2 + 1.32 \times 10^{-4} s + 3.8722}$$

而力矩与丝杠位移之间的传递函数更为复杂，一般是一个 4 阶系统，经简化后可以用 2 阶系统近似。

$$\frac{x(s)}{T(s)} = \frac{0.00011167(s + 33006)}{s^2 + 1.245s}$$

六、实验步骤

1. 熟悉丝杠系统的组成及电机调速系统的原理。
2. 通过对系统的分析，建立系统的数学模型。
3. 通过 Matlab 仿真，分别对丝杠系统的速度、滑块位置进行控制，要求响应速度快，无超调。
4. 使用 PLC 相关软件，将控制率参数进行设置，通过实际系统控制丝杠的位置，要求精度不大于 1mm。
5. 观测实验结果，记录实验数据，及时绘制实验结果图形，填写实验数据表格，完成实验报告。

七、注意事项

1. 在实物实验时，由于控制器的输入涉及 220V 电压，所有在上电后禁止接触所有裸露的接头，线路接好后才允许通电。
2. 实验过程中密切注意丝杠的运动趋势，发现问题及时停止。运行过程中禁止将身体任何部位放入丝杠的运动范围内。

八、实验报告要求

1. 写明数学模型建立的过程。
2. 写清控制率设计及参数整定过程，对 Matlab 仿真结果进行分析。
3. 可以以照片的形式记录最后的控制效果。

实验报告模板可参照附件 1。

九、课后思考题

1. 理解实际控制系统的设计过程，掌握 PID 参数整定的方法。通过查阅资料掌握 PID 参数整定的具体方法。
2. 了解 PLC 在实际系统中的使用，通过查阅资料了解 PLC 的基本组成及特点。

十、参考资料

1. 自动控制原理，程鹏主编，高等教育出版社，2010。
2. 自动控制原理，胡寿松主编，科学出版社，2007。



3. Modern Control Engineering (Fifth Edition), Katsuhiko Ogata, Prentice Hall, 2011.
4. Modern Control Systems (Ninth Edition), Richard C. Dorf 等, Pearson Education, 2004.

附件 1 实验报告模板



成绩 _____

北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

自动控制原理实验 A(1) 实验报告

院（系）名称 _____
学 号 _____
姓 名 _____
指 导 教 师 _____

年 月 日

实验** *****

(三号，黑体；居中；单倍行距)

实验时间_____ 实验编号_____ 同组同学_____

(“实验编号”填写实验所用计算机编号；若有同组实验同学，需在“同组同学”处填写其姓名，没有则填无)

一、实验目的(四号黑体；左对齐；单倍行距)

1. 概述实验目的。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；单倍行距。

二、实验过程与结果

1. 写清实验过程与结果。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；单倍行距。

三、结果分析

1. 分析实验结果。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；单倍行距。

四、收获、体会及建议

1. 总结实验收获；欢迎同学提出改善实验课程的建议。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；单倍行距。

注意：括号（）内为说明事项，最终实验报告中须删除！