

研究生学号：2013522085

密 级：公 开



吉 林 大 学
硕 士 学 位 论 文
(学 术 学 位)

四容系统实验装置设计及算法研究

Four-tank System Equipment Design and Algorithm Research

作者姓名：侯成玉

专 业：控制理论与控制工程

研究方向：过程控制

指导教师：于树友 副教授

培养单位：通信工程学院

2016年6月

四容系统实验装置设计及算法研究

Four-tank System Equipment Design and Algorithm Research

作者姓名：侯成玉

专业名称：控制理论与控制工程

指导教师：于树友 副教授

学位类别：工学硕士

答辩日期：2016年6月4日

未经本论文作者的书面授权，依法收存和保管本论文书面版本、电子版本的任何单位和个人，均不得对本论文的全部或部分内容进行任何形式的复制、修改、发行、出租、改编等有碍作者著作权的商业性使用（但纯学术性使用不在此限）。否则，应承担侵权的法律责任。

吉林大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：侯成玉

日期：2016年6月4日

摘 要

随着生产的发展和工艺水平的不断提高,越来越多具有时滞、非线性、耦合的复杂被控对象应用到实际的生产过程中。通常情况下将简单的控制算法,如 PID 控制器,应用于复杂的被控对象难以达到预期的控制效果,因此非常有必要研究用先进控制算法来实现对复杂被控对象的控制。如果先进控制算法缺乏实物验证,先进的控制算法投入实际应用将会是一个很长的周期。因此根据过程控制中典型对象的特性,开发一套具有工业背景的实验装置具有很重要的现实意义。

本课题为满足自动化专业教学和学术理论研究需要,自主设计研发了一套四容系统实验装置。实验装置分为硬件部分和软件系统两部分。硬件上采用了工控机、PCI 数据采集卡、压力传感器、隔膜泵等工业生产中常用的设备,搭建了硬件平台并对硬件进行了测试。软件系统采用 MATLAB 软件实现,根据系统功能特点实行模块化设计。利用 MATLAB 强大的数据处理能力和对硬件的良好支持,通过 MATLAB 编程的方法实现系统的通讯和控制需求,最后利用 MATLAB/GUI 设计可视化操作界面,实现四容系统的集成。通过操作界面,可以实现实验参数的配置、数据采集与存储、控制过程的动态显示等功能。本文还对软件系统的移植进行了研究,使软件系统能够脱离 MATLAB 环境使用。

本文介绍了根据伯努利方程建立的系统机理模型,并通过系统辨识的方法获得系统传递函数的相关参数。根据四容系统的特性分别设计了基于辨识模型的内模控制器和基于机理模型的 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器。最后将设计的控制器在四容系统实验装置上进行实验验证,取得了预期的控制效果,达到了实验装置设计的目的。

四容系统实验装置是一个开放的实验平台,能验证多种先进的控制算法,为自动化相关专业的学生和科研人员提供了一套性能稳定、操作简单的实验装置。

关键词 四容系统, MATLAB, 内模控制, \mathcal{H}_∞ 控制

Abstract

With the development of production and technical level, an increasing number of complex plants are applied to actual production process, which have the characteristics of time delay, nonlinearity and coupling. Since simple control algorithms, such as PID controller, can not deal with the control problems of complex systems well, it is necessary to look for advanced control algorithms to achieve better control performances. If advanced control algorithms are lack of practicality experiment, it will be a long period to put it into practical use. Therefore it has important practical significance to design a suit of experiment device with some industrial backgrounds according to the characteristics of typical objects in process control.

In order to meet the needs of teaching and academic studies on Automation, a set of four tank experimental device is designed and developed. In this thesis the experimental device is made up of hardware and software systems. The industrial computer, PCI data acquisition card, input type liquid level sensor, diaphragm pumps and other common equipments related to industrial production are used to build a hardware platform. The software system is implemented by MATLAB software, and the modular design is carried out according to the system functional characteristics. Taking the advantage of powerful data processing ability and good support for hardware of MATLAB software, communication and control requirements of the system are realized by programming on MATLAB software. In addition, a visual operating interface is designed base on MATLAB/GUI to realize the integration of four tank system. By using this operating interface, parameters configuration, data acquisition and storage, dynamic display of control process can be done. Furthermore, the transplantation of software system is studied so that the software system can be used without MATLAB environment.

In this thesis, the mechanism model of four tank system is introduced, and the parameters associated with the system transfer function are obtained by system identification. According to the characteristics of the four-tank system, an internal model controller based on the identification model and a H_∞ state feedback controller based on mechanism model are designed, respectively. Finally the designed controllers are applied to the four tank system, and some related experiments are conducted. The results are obtained in the experiments and the purpose of the design of the experimental device is achieved.

The experimental device is a platform, which can be used to verify various advanced control algorithms. Thus it provides a simple experimental device for students and researchers.

Key Words: Four-tank System, MATLAB, Internal Model Control, H_∞ Control

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 多容水箱的研究现状	1
1.2.2 控制算法研究现状	4
1.3 本课题主要工作及章节安排	4
第 2 章 实验装置硬件设计	6
2.1 实验装置的总体设计	6
2.2 实验装置硬件设计	7
2.2.1 水槽和水箱	7
2.2.2 检测机构	8
2.2.3 水泵及调速机构	9
2.2.4 数据采集卡	10
2.2.5 工控机	11
2.3 数据采集卡的安装和测试	11
2.3.1 数据采集卡的安装	11
2.3.2 数据采集卡测试	12
2.4 本章小节	13
第 3 章 软件系统设计	14
3.1 软件系统构成	14
3.2 操作界面设计	15
3.2.1 开发环境介绍	15
3.2.2 软件系统操作界面	17
3.2.3 GUI 程序设计	19

3.3 数据采集模块	19
3.3.1 数据采集卡参数配置	19
3.3.2 DAQNav 在 MATLAB 中的应用	21
3.3.3 数据采集功能实现	22
3.4 图形显示模块	23
3.5 模拟信号的标度变换	24
3.5.1 液位传感器信号的标度变换	25
3.5.2 水泵控制信号的标度变换	29
3.6 本章小结	31
第 4 章 四容系统数学模型	32
4.1 四容系统工作原理	32
4.2 四容系统数学模型	32
4.3 四容系统参数辨识	35
4.3.1 阶跃响应法系统辨识	35
4.3.2 四容系统参数辨识	38
4.4 本章小结	41
第 5 章 四容系统控制算法实现	42
5.1 内模控制	42
5.1.1 内模原理	42
5.1.2 分散内模控制	44
5.1.3 仿真分析	46
5.1.4 内模控制实验	46
5.2 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制	47
5.2.1 \mathcal{H}_∞ 控制理论	47
5.2.2 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器设计	48
5.2.3 四容水箱 \mathcal{H}_∞ 控制	50

5.2.4 仿真与分析	52
5.2.5 \mathcal{H}_∞ 控制实验	53
5.3 本章小结	54
第 6 章 总结与展望	55
参考文献	57
附 录	62
1 PCI-1710U 数据采集卡主要参数	62
2 实验装置软件系统移植	63
作者简介及研究成果	65
致 谢	66

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

液位控制是工业生产中的一个重要方面，在石油化工、食品加工、冶金、制药等诸多行业生产中都有体现。在这些生产领域中的液位控制一般都伴随着高温、高压，甚至易燃、易爆或者有毒物质，如果出现操作失误，就会引发事故，造成设备损失和人员伤亡。比如，锅炉气泡的控制，如果锅炉内液位过低，会使锅炉过热，可能发生爆炸；精馏塔液位控制的精度会影响产品的质量与生产成本。可见，在实际生产中，液位控制的精准程度和控制效果往往直接影响设备的性能和生产安全，与企业的生产效益和成本密切相关，为了保证生产安全、操作简便，就必须保证液位循环系统运行的准确性、迅速性和平稳性。

四容水箱液位控制系统（四容系统）是具有时滞、非线性、双输入双输出、耦合等特性的典型对象^[1]。工业生产过程中的很多被控对象（如蒸汽锅炉液位控制、汽水换热器液位控制）都可以用四容系统的数学模型来描述，因此四容系统具有很高的实际应用价值。同时，四容系统可以为自动化专业学生提供一个开放的、工业化的实践平台，通过相关实验可以使学生加深对课程知识的理解并能够用所学的知识解决实际问题，使学生对控制理论和过程控制有更深刻的认识；四容系统也为研究人员提供一个算法验证的实验平台。根据工业过程控制典型对象的特性和学术理论研究的需要，我们自主设计开发了四容水箱液位控制系统实验装置，为自动化相关专业学生和科研人员提供了一套稳定可靠、算法开放、操作简单、界面友好的实验平台。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 多容水箱的研究现状

多容水箱液位控制系统作为典型的过程控制对象，在控制领域具有非常重要的作用，国内外相关研究机构和学者很早以前就开始了多容水箱系统的研究。水箱的结构从单容^[2]、双容（图 1.1 (a)水平结构^[3]和 1.1(b)垂直结构^[4]）、三容^[5]（图 1.2）、发展到具有强耦合的多变量四容水箱（图 1.3）^[6]。多容水箱液位控制实验设备也有了很大的发展，

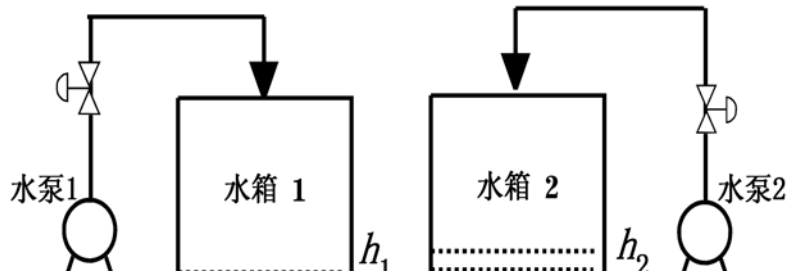
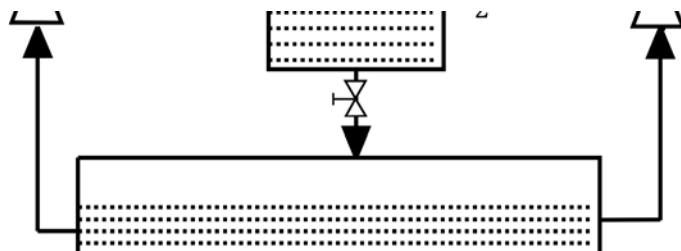
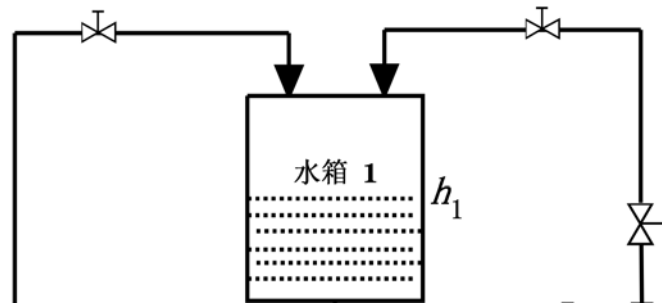


图 1.1 (a) 水平结构双容水箱结构图



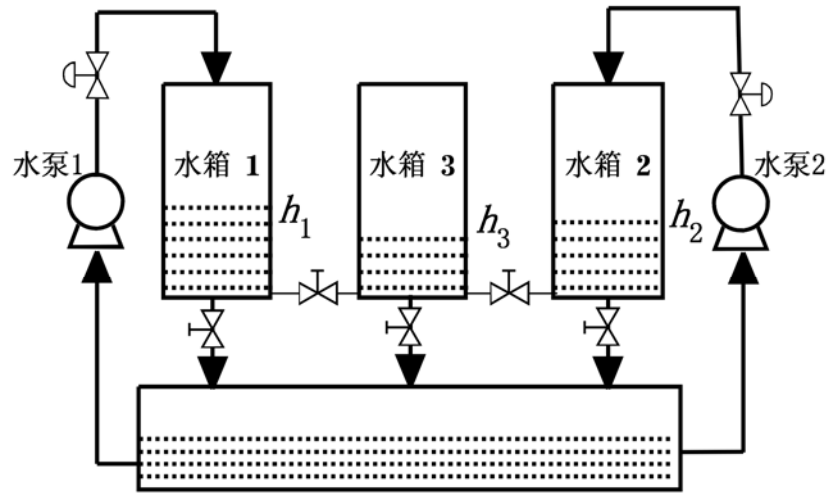


图 1.2 三容水箱结构图

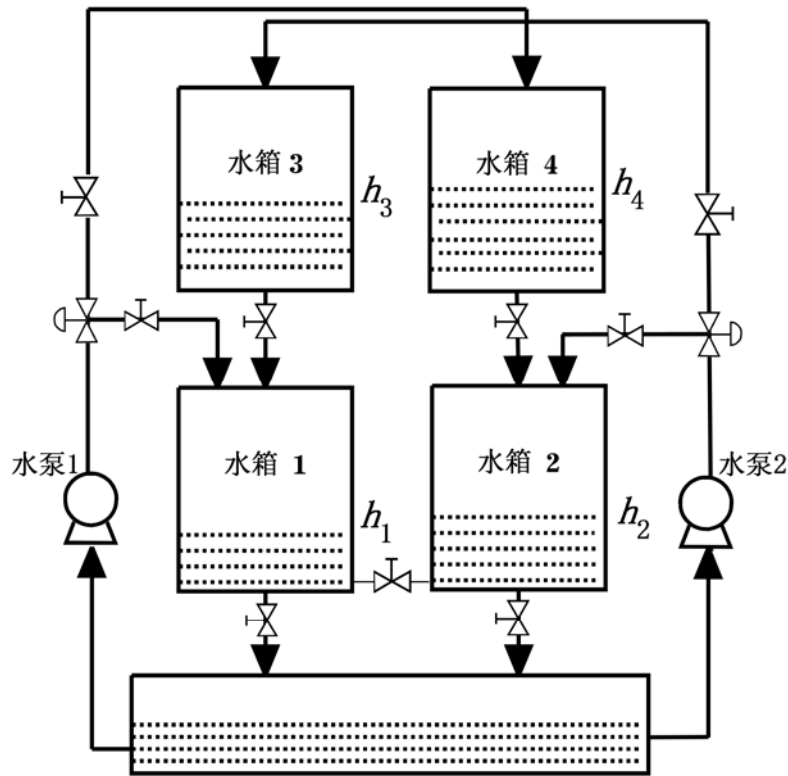


图 1.3 四容水箱结构图

液位控制系统的研制，固高科技有限公司就是其中之一。香港城市大学协同固高科技有限公司共同研制了 CWT 系列液位控制实验装置，经过多年的实践检验，该实验装置提供了新颖的实验课程，为先进算法提供了试验平台，充分体现了其在教学、科研方面的价值；浙江中控科技有限公司研制开发的 CS-4000 型四容水箱液位控制系统实验装置^[7]，是集智能仪表技术、计算机技术、通讯技术、自动控制技术为一体的普及型多功能实验

装置，可以对液位、温度、压力、流量等过程参数应用多种控制方案进行控制，在国内应用较为广泛。这些多容水箱实验装置的出现为各科研机构 and 各大院校从事自动控制理论学习、研究的教师，研究人员及自动化相关专业的本科生和研究生提供了一个具体的控制对象，为先进过程控制系统研究与控制理论创新带来了便利。

1.2.2 控制算法研究现状

国内外很多实验室利用多容水箱液位控制系统进行了大量的算法研究，R.Suja Mani Malar 提出了分散预补偿模糊 PI 控制器的设计方法^[8]；Tobias Raff 提出了基于无源性模型预测控制方法，并成功应用到四容水箱液位控制系统^[9]；针对四容系统多变量耦合的情况，文献[10, 11, 12]通过解耦控制实现对多个被控变量进行独立控制；文献[13-16]采用一种模型预测控制策略进行液位过程控制，该策略是一种基于模型的闭环优化控制策略，具有控制效果好、鲁棒性强和良好的自适应能力等特点，可以有效克服控制过程的不确定性和非线性；文献[17-20]设计了基于神经网络的液位过程控制器，获得了满意的过程控制性能；R. Sivakumar 设计了自适应神经模糊推断系统应用于四容系统^[21, 22]，并与传统的 PI 控制器、模型预测控制器控制效果进行对比。由于多容水箱液位控制系统能够在实验过程中模拟实际应用中的故障，如在水箱底部设置故障点模拟容器漏水，或者设置执行器故障点等，有很多学者对故障诊断和容错控制在多容水箱上的应用进行了研究，文献[23, 24]研究了三容系统执行器故障的容错控制方法；文献[25, 26]以三容水箱为研究对象，研究了神经网络在故障诊断子系统的应用；文献[27]设计了基于广义内模控制结构的容错控制器应用于四容系统非最小相位系统执行器容错控制；文献[28]提出了一种新的多变量自适应模糊控制器的设计方法，实现了四容系统执行器故障的控制。

1.3 本课题主要工作及章节安排

本课题的主要工作是开发一套基于 MATLAB 软件平台的四容水箱液位控制系统实验装置。实验装置主要分为硬件和软件系统两部分，首先选择合适的元器件搭建硬件平台，并对所选硬件进行了测试。然后根据实验装置功能特点对软件系统进行模块化设计，利用 MATLAB 软件编程方式实现软件系统功能。MATLAB 提供了数据采集工具箱并对 PCI 数据采集卡有很好的支持，通过编写数据采集卡的接口控制程序，实现对四容系统的控制。利用 MATLAB/GUI 设计系统可视化操作界面，实现四容系统集成。最后本课题

题推导了四容系统的数学模型，通过系统辨识的方法获得系统的参数，设计了基于四容系统辨识模型的内模控制器和基于机理模型的 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器，应用于四容系统实验装置，获得了良好的控制效果，验证了实验装置设计的可行性。本实验装置不仅能够提供传统过程控制实验和智能控制实验平台，还可以让用户进行硬件在环仿真和测试，对控制算法进行验证。

本文结构和各章的主要内容如下：

第 1 章绪论部分主要介绍本次毕业设计的研究背景及意义、多容水箱及控制算法的研究现状，并对本文的各章节主要内容进行了简单的介绍。

第 2 章介绍了四容水箱实验装置硬件设计方案。本章首先对实验装置总体设计方案进行了介绍，根据实验装置功能需求选择工业上常用的硬件设备，主要包括：水箱、液位传感器、水泵、PCI 数据采集卡、工控机。然后搭建硬件平台并对数据采集卡进行了测试。

第 3 章介绍了实验装置软件系统设计方案。根据实验装置功能特点，我们对软件系统采用模块化设计，通过 MATLAB 软件编程方式实现。主要内容包括可视化操作界面的设计，数据采集模块，实时显示模块等。本章还对传感器和水泵模拟信号标度变换进行了介绍。

第 4 章主要介绍了四容系统工作过程和数学模型。首先根据伯努利方程推导出四容系统的数学模型，然后对阶跃响应参数辨识的基础理论进行了介绍，最后借助 MATLAB 系统辨识工具箱获得了四容系统传递函数的相关参数。

第 5 章主要介绍了四容系统控制算法的实现。本章主要设计了基于辨识模型的内模控制器和基于机理模型的 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器，通过仿真分析和实物验证，都取得了良好的控制效果，验证了四容系统实验装置设计的可行性。

第 6 章总结本文完成的主要工作，明确下一步研究方向。

第 2 章 实验装置硬件设计

四容水箱液位控制系统实验装置是一个开放性较好、运行稳定，可同时提供仿真和实时控制的实验平台。在实验装置的开发设计过程中，我们参考了国内外多个成熟的设计方案，充分考虑了各种元器件应用的普遍性、可靠性、经济性和软硬件开发的通用性，尽可能地降低成本和缩短开发周期，提高资源的利用效率。

2.1 实验装置的总体设计

本实验装置分为硬件和软件系统两个部分。硬件部分主要包括水槽、水箱、检测机构、执行机构、数据采集卡、工控机等。实验装置软件系统采用 MATLAB 编程设计，实现软件平台与硬件平台的通讯互联，控制算法通过 MATLAB 编程实现；使用 MATLAB/GUI 工具设计开发可视化操作界面，实现整个系统的集成。此设计方案平台扩展性强，开发周期短；有良好的交互性能。四容系统的总体结构如图 2.1 所示。

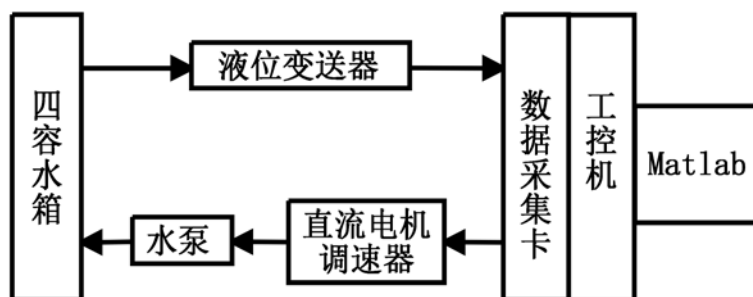


图 2.1 四容系统总体结构示意图

系统运行时，液位传感器将检测四个水箱的液位高度并转化为模拟电压信号输出，通过数据采集卡采集液位传感器的电压信号并通过 A/D 转换成计算机能够处理的数字信号，通过调用 MATLAB 编程的控制算法实现系统控制，控制器输出的控制量经过数据采集卡 D/A 转换为模拟量，通过控制水泵的电压达到控制水泵流量的目的，从而实现对四容系统下面两个水箱液位的控制。四容系统的控制量是水泵的电压，输出量是水箱的液位高度。MATLAB/GUI 操作界面可实现对输入、输出数据的监控和控制过程的动态显示。

2.2 实验装置硬件设计

实验装置的硬件部分由水槽、水箱、压力传感器、数据采集卡、水泵以及调速模块、工控机、稳压电源等组成。

2.2.1 水槽和水箱

水槽和水箱由高透明度亚克力材料制成。亚克力(PMMA)，又名有机玻璃，是一种可塑性高分子材料，具有透明度好，稳定性强，耐腐蚀，有良好的加工性能，既可采用热成型，也可以采用机械加工的方式成型。由亚克力材料制作的水箱既美观，又方便实验中对液位变化的观察。

实验装置分为上下两个部分，中间用六根不锈钢管进行支撑，用法兰进行固定。四个水箱分别采用螺栓固定在有机玻璃板上。该实验装置各个部分都可以拆装，方便搬动和运输。水泵和各个水箱的连接管道采用塑料管，有较好的韧性和强度，不易产生变形。实验装置上装有多个阀门，通过调节阀门的开闭可以构成单容、双容、四容系统被控对象，同时通过阀门的开度来改变单个水箱的特性。我们所设计的四容水箱液位控制系统实验装置实物如图 2.2 所示。



图 2.2 四容系统实验装置

2.2.2 检测机构

检测机构是实验装置的重要组成部分，检测机构的测量精度直接影响系统的性能。实验装置检测机构采用的是飞思卡尔公司（Freescale）生产的 MPX5010DP 型差压传感器。MPX5010 型压力传感器是温度补偿、零位和满量程校正、信号调理电路全部集中在一个单片上，温度补偿范围为 0~85℃，可与微机直接接口，测量方式有表压（D）、差压（DP）和绝压（A、AP）型。

MPX5010DP 型差压传感器主要技术参数见表 2.1。

表 2.1 差压传感器主要技术参数

型号	MPX5010DP	量程	0~10KPa
供电电源	5VDC(±5%)	供电电流	0~10mA
输出形式	0~5V	精确度(0~85℃)	5%V _{FSS}
响应时间	1ms	满量程电流输出	0.1mA
预热时间	20ms	长期稳定性	±0.5% V _{FSS}
环境温度	-10~60℃	重量	4g

注：V_{FSS}（Full Scale Span）满量程电压是指压力传感器的满量程压力输出电压和最小额定压力输出电压的代数差。

压力传感器有六个引脚，其中一侧引脚有缺口，编号为 1，其它依次编号。引脚接线如表 2.1 所示。

表 2.2 MPX5010DP 引脚接线

引脚编号					
1	2	3	4	5	6
Vout	接地	Vs	空	空	空

表 2.2 中，Vout 表示传感器电压输出，接数据采集卡的输入端口。Vs 表示供电电压，接电源正极，引脚 2 接电源负极。

MPX5010DP 型压力传感器采用三线制电压输出，采用两芯屏蔽线连接，两芯电线分别接引脚 1 和引脚 3，屏蔽层接引脚 2，这样能有效的降低干扰。压力传感器连接方法如图 2.3 所示。

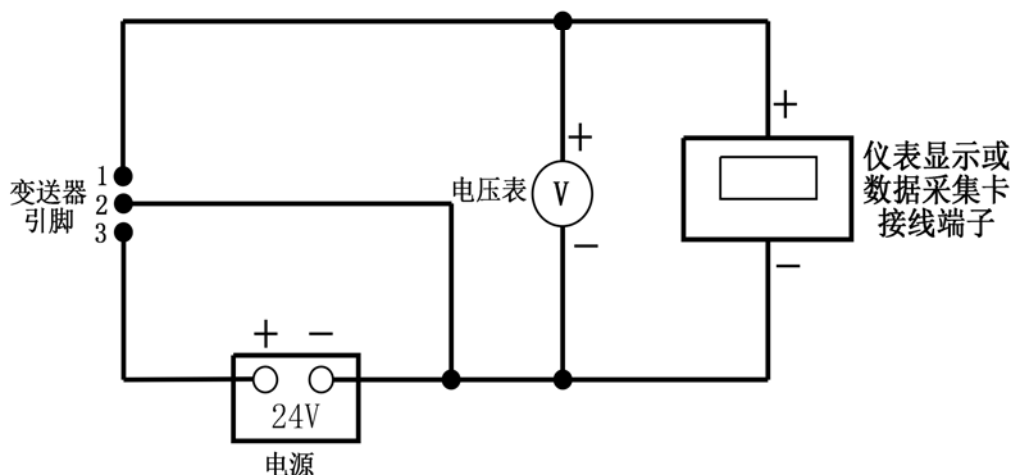


图 2.3 液位传感器连接方法

对压力传感器输出电压采样后进行标度变换,就可以得到水箱液位高度与传感器输出电压之间的数学关系。

2.2.3 水泵及调速机构

水泵及调速机构是四容系统实验装置的执行机构。四容系统通过对液位传感器信号的采集、分析、计算,形成调节数据发送给执行器。水泵接受计算机的控制信号,改变液体的流量,使水箱液位保持在设定值附近。执行机构的精确程度和反应速度与控制系统的控制性能密切相关。

2.2.3.1 水泵

本实验装置执行机构采用的是 SHURflo 2088-343-135 型水泵,水泵的主要技术参数见表 2.3。

表 2.3 SHURflo 2088-343-135 水泵主要技术参数

工作电压	12VDC	最大流量	11.3L/min
自吸高度	3.7m	最大扬程	3m
最大压力	45PSI(3.1bar)	接口尺寸	1/2"外螺纹
介质最大温度	77°C	外壳材料	聚丙烯
质量	2.18Kg	驱动方式	电动

注: PSI (Pounds per square inch) 为压力单位, 磅/平方英寸, 1bar \approx 14.5PSI。

该水泵是电动隔膜泵,电机通过减速箱带动左右两端柱塞上面的隔膜一前一后往复

运动将液体挤入到管道中。隔膜泵又称控制泵，是执行器的主要种类。该水泵流量特性（液体流过阀门的相对流量与阀门的相对开度的关系）为直线型，使得该水泵具有良好的控制特性；由于隔膜将被输送介质和传动机械件分开，所以介质不会向外泄漏；该水泵动态响应速度快，控制精度高，内置止回阀，可防止介质回流；同时该水泵可干转，散热良好，适合长时间工作。

2.2.3.2 直流电机调速模块

水泵的调速模块选用的是上海弗申电子有限公司生产的 DTS-V-10-24FS 型直流电机调速模块。该模块采用微处理器和功率 MOS 管，具有过压、过流保护功能，调速范围宽，工作稳定可靠，调速精度高，广泛应用于轻工、纺织、化工、造纸等需要对直流电机及直流风机进行无级调速的场合。该直流电机调速模块的控制调节方式可以是输入电压调节，也可以是电位器调节。直流电机调速模块的主要技术参数见表 2.3。电气连线如图 2.4 所示。

表 2.4 直流电机调速模块主要技术参数

产品名称	DTS-V-10-24FS	工作电压	12VDC
额定电流	10A	输出电压范围	0~12V
控制信号	0~5V/电位器	输入输出电路介质耐压	2500VAC

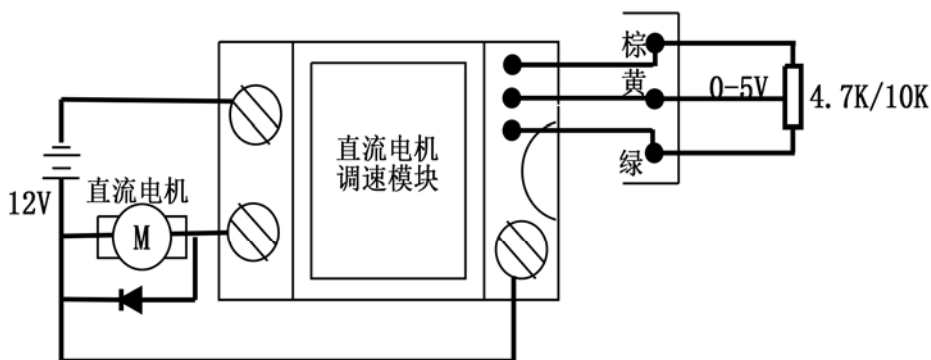


图 2.4 直流电机调速模块连接方法

2.2.4 数据采集卡

数据采集卡，是用来实现数据采集和控制功能的计算机扩展卡，主要通过 USB、PXI、PCI、PXI Express 等总线接入计算机。本实验装置采用台湾研华公司生产的 PCI-1710U 数据采集卡，该卡是一款 PCI 数据总线的多功能数据采集卡，它将数字量、

模拟量采集和控制功能集中在一块板卡上，具有操作简单、参数配置方便、性能稳定等特点。该板卡主要有 16 路单端或 8 路差分模拟量输入、2 路模拟量输出、16 路数字量输入、16 路数字量输出、计数器/定时器等功能，采样速率最高达 100 kHz，能够满足四容水箱液位控制系统数据采集和控制的要求。

PCI-1710U 数据采集卡配备了 PCL-10168 电缆和 ADAM-3968 接线端子进行信号连接。PCL-10168 屏蔽电缆是专门为 PCI-1710 系列数据采集卡接线所设计的，它可以降低模拟信号线的噪声。该电缆采用双绞线，对模拟信号线和数字信号线分开屏蔽，这样能使信号间的交叉干扰降到最低。

PCI-1710U 数据采集卡在 Windows 下采用 32/64 位动态连接库驱动程序，可以在 MATLAB、VC、VB、C++ 和 Dephi 等软件环境下实现对数据采集卡的底层操作，开发出界面友好的控制系统。数据采集卡详细参数见附录 1。

2.2.5 工控机

工控机是四容水箱液位控制系统实验装置的核心。工控机根据输入设备传来的数据，利用预先搭建好的软件平台及编译好的控制算法对数据信息进行处理，将产生的控制信号通过输出设备送至执行器。

本实验装置采用研华 IPC-610L 工控机。工控机机箱具有耐挤压，耐腐蚀，抗灰尘，抗振动，抗辐射等优点，适用于环境比较恶劣的工业生产场合。工控机选用的主板是研华 AIMB-701VG-00A1E，支持 Intel Core i7/i5/i3/Pentium 处理器，H61 芯片组，拥有 2 个 DIMM（Dual Inline Memory Module，双列直插内存模块）插槽，DDR3 1066/1333，最大支持 16GB，支持 VGA/DVI-D 双显，双 GbE（Gigabit Ethernet，千兆以太网）网口，支持 RS232/422/485，带有自动数据流控制，支持 1 个 PCIe x16 和 5 个 PCI 扩展插槽，具有良好的扩展性。

2.3 数据采集卡的安装和测试

2.3.1 数据采集卡的安装

数据采集卡的硬件和软件的安装流程如图 2.5。

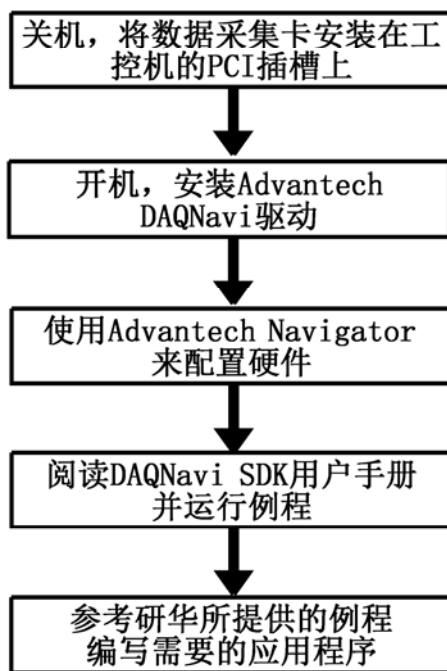


图 2.5 数据采集卡安装流程图

在 PCI-1710U 驱动安装完成后，我们可以通过系统设备管理器查看驱动是否成功安装。如果板卡正确安装，我们将会看到板卡的设备名称。如果没有看到设备名，而只看到一个感叹号，则表示设备驱动并未正确安装。

2.3.2 数据采集卡测试

在安装完数据采集卡驱动 DAQNav i (Data Acquisition Navigate) 后，软件开发工具包 SDK (Software Development Kit) 和配置软件 Navigator 也会一起安装。SDK 包含了软件开发的所有例程，Navigator 是对数据采集卡进行管理和配置的工具，我们可以利用 Navigator 对数据采集卡进行测试。

1. 从开始菜单/所有程序/Advantech Automation/DAQNav i，打开 Navigator，显示界面如图 2.6 所示。当计算机上安装了某个产品的驱动程序后，在 Installed Devices 列表中会显示该板卡。

2. 在图 2.6 界面中点击 Device Test，可以看到板卡测试界面。四个模拟输出通道可以通过软件设置选择输出正弦波、三角波、方波，用户也可以设置输出波频率以及输出电压幅值。要想得到恒定电压输出，可以将测试界面中的“Amplitude”设置为 0，将“DO offset”设置为待输出的电压值。通过 Navigator 的 test 界面来测试板卡的基本功能。如果测试通过，证明板卡可以正常使用。



图 2.6 Navigator 显示界面

2.4 本章小节

本章主要介绍了四容水箱液位控制系统实验装置硬件设计方案。首先对实验装置的总体设计方案和四容系统工作原理进行了介绍。然后从实验需求出发，确定了组成系统的硬件组件和软件开发平台，并对硬件主要组成部分的选型及相关性能参数进行详细说明。最后本章还对数据采集卡的硬件和软件安装流程进行了简要介绍，并对数据采集卡进行测试。

第 3 章 软件系统设计

四容水箱液位控制系统实验装置提供了一个开放的算法验证平台，可以完成多种先进控制算法实验，而对于每一个实验项目的操作流程都是相同的。根据实验装置这个特点，软件系统设计我们按功能实行模块化设计，通过 MATLAB 编程实现，最后设计 MATLAB/GUI 操作界面，对软件系统进行封装。用户通过 MATLAB/GUI 操作界面对四容系统的控制过程进行操作，实现实验参数配置，数据的采集、存储、查看和图形显示等功能。MATLAB 软件对 PCI-1710U 数据采集卡有很好的支持，数据采集卡驱动程序 DAQnavi 提供了 MATLAB 工具箱的例程，用户可以参照相关例程开发自己所需要的程序，这样可以降低工作强度，缩短开发时间，提高工作效率。

3.1 软件系统构成

四容系统实验装置软件系统采用模块化设计，各个模块功能都是通过 MATLAB 软件编程实现。软件系统主要由数据采集模块、参数配置模块、控制功能模块、图形显示模块、算法选择模块和操作界面六部分组成。四容系统软件结构如图 3.1 所示。

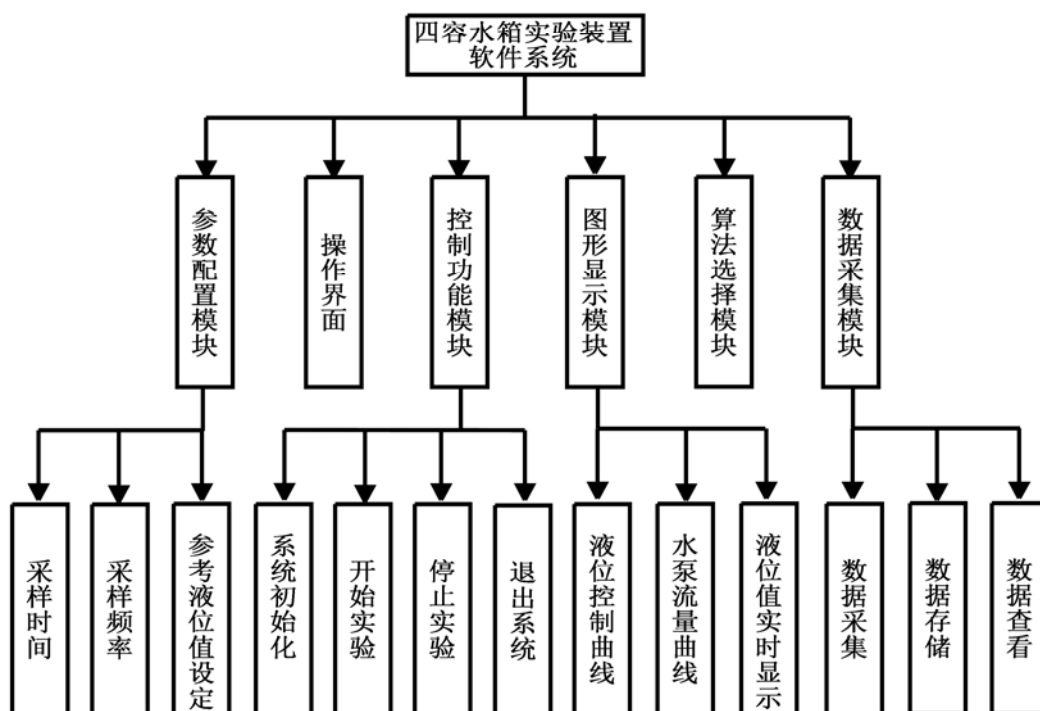


图 3.1 实验装置软件系统构成

1. 操作界面是用户与四容系统交互的窗口，在操作界面上我们设置了其他五个功能模块的按钮和坐标轴，通过对相关按钮的操作就可以实现对应的功能。

2. 参数配置模块。用户通过参数设置模块可以对参考液位值、采样时间和采样频率进行配置。

3. 数据采集模块。实现液位传感器模拟信号的采集和控制信号的输出。数据存储、数据查看等功能是通过 GUI 操作界面实现的。通过对数据的存储和历史数据的查看，方便后期对所采集的数据进行分析。

4. 控制功能模块。通过功能模块用户可以对系统运行过程进行控制，主要有系统初始化、开始实验、停止和退出实验平台等功能。

5. 图形显示模块。图形显示主要是在 GUI 操作界面的坐标轴实时显示数据曲线，方便观察液位变化曲线和水泵流量变化，并进行实时数值显示。

6. 算法选择模块。对于四容系统可以实现多种控制算法，用户需要将用 MATLAB 编写的算法程序导入到算法模块就可以实现对四容系统液位的控制。

3.2 操作界面设计

3.2.1 开发环境介绍

图形用户界面（Graphical User Interface，GUI）是由窗、轴、按键、菜单、工具图标、文字说明等图形对象（Objects）构成的一个用户界面^[29]。在这种用户界面下，用户通过鼠标和键盘选择、激活这些图形对象，实现计算、绘制图表和产生动画等操作。MATLAB 为 GUI 开发提供一个方便高效的集成开发环境 GUIDE（GUI Development Environment），用户可以根据需要自定义操作界面。与通过 M 函数编写相比，GUIDE 平台更直观，更方便快捷。

3.2.1.1 MATLAB/GUI的基本构成

MATLAB 用户图形界面包含以下三个基本元素^[30]：

1. 组件。在 MATLAB/GUI 中每一个项目（如按钮、标签、编辑框等）都是一个图形化组件。组件可分为三类：图形化控件（如按钮、编辑框、滚动条等）与静态元素（窗口和文本字符串）、坐标系和菜单。

2. 图形窗口。GUI 的图像窗口是用来存放组件的。在绘制数据图像时，图像窗口通常会被自动创建，也可以用函数 `figure` 来创建空图像窗口。

3. 回应。即用户对图形界面的组件进行操作，程序就会有相应的动作。

3.2.1.2 GUIDE介绍

在 MATLAB 中，图形对象由图形命令产生，GUIDE 是一个组件布局工具集，提供了一套可视化的创建图形窗口的工具，用户可以方便的创建 GUI 应用程序^[31]。用户将设计好的 GUI 运行后生成一个 FIG 文件和一个 M 文件，FIG 文件包括用户所需的组件资源和所有 FIG 文件包含序列化的图形窗口对象。M 文件包括 GUI 设计、控制函数以及定义为子函数的用户控件回调函数。最初生成的 M 文件中只有各个控件、菜单的回调函数原型和注释，用户可以根据需要编写回调程序以实现期望的功能。GUIDE 提供的空白模板如图 3.2 所示。

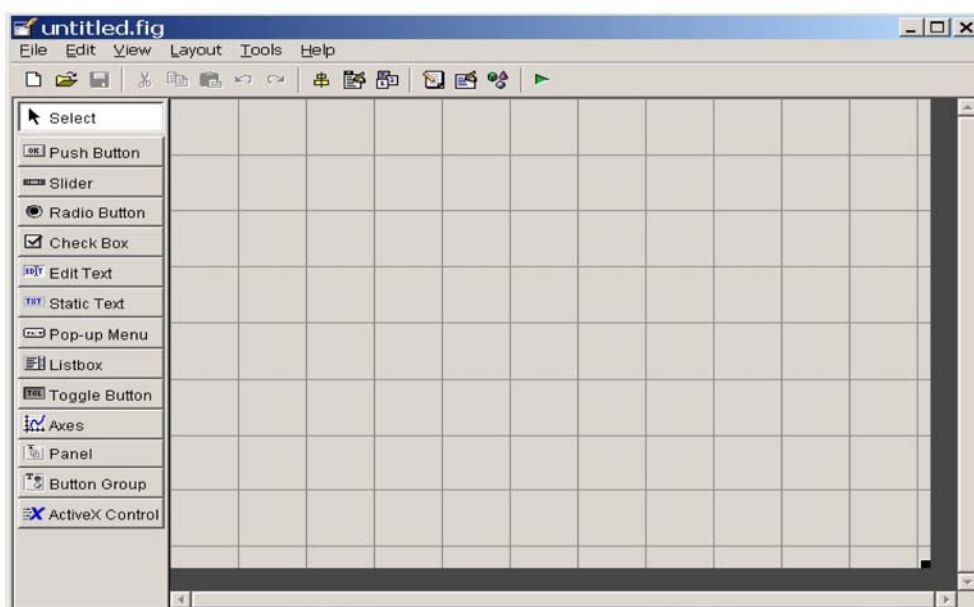


图3.2 GUI空白模板

GUIDE 的组成部分主要有以下方面。

1. 界面设计编辑器

界面设计编辑器是用来选择控件面板中的控件，存放在图形窗口中。界面设计编辑器由以下3个部分组成

(1) 控件工具板。MATLAB R2010a版本的软件控件工具提供10种不同类型的控件。控件分布在界面设计编辑器的左侧，用户可以直接从工具板中通过鼠标拖动方式将所选控件放置到图形编辑器窗口中，可以通过鼠标单击控件选定后再进行拖动来确定控件的大小。

(2) 对齐工具。是用来对界面内的控件进行布局。用户通过鼠标选择并拖动任意控件（群）对其进行控件排列，包括对齐方式、控件间的间距设定等功能。

(3) 布局编辑器。用于从控件工具板上选择控件对象并放置到布局区域，布局区域被激活后就成为GUI图形窗口。布局区域内可以使用网格和标线辅助设计。

2. 对象浏览器。用于获得当前 MATLAB 图形用户界面程序中所有的对象信息，对象的类型，同时显示控件的名称和标识。

3. 属性检查器。利用属性检查器，可以检查并设置控件的属性值。用鼠标双击该控件，即可打开属性检查器，用户可以通过设置控件的属性值，设计控件的外观特征。

4. 回调函数编辑器。每一个控件，必须要有函数体才能实现相应的功能，用户通过回调函数编辑器编写自己需要的回调函数，实现对控件功能控制。当用户用鼠标或键盘选择或激活GUI界面的图形对象时，就会引起控件外形变化，并触发软件程序的回调函数，完成期望的功能，如绘图、计算等。

5. 菜单编辑器。用来实现菜单的设计和编辑。利用菜单编辑器快捷键可以任意添加或删除菜单，设置菜单项的属性。

3.2.2 软件系统操作界面

MATLAB/GUI 操作界面提供了系统与用户交互的窗口。我们通过 GUI 对软件系统模块进行封装，用户只和操作界面上的组件发生交互，不需要去追究封装在内部的复杂过程的代码。封装后的 GUI 界面可分为四个区域。四容系统操作界面如图 3.3 所示。

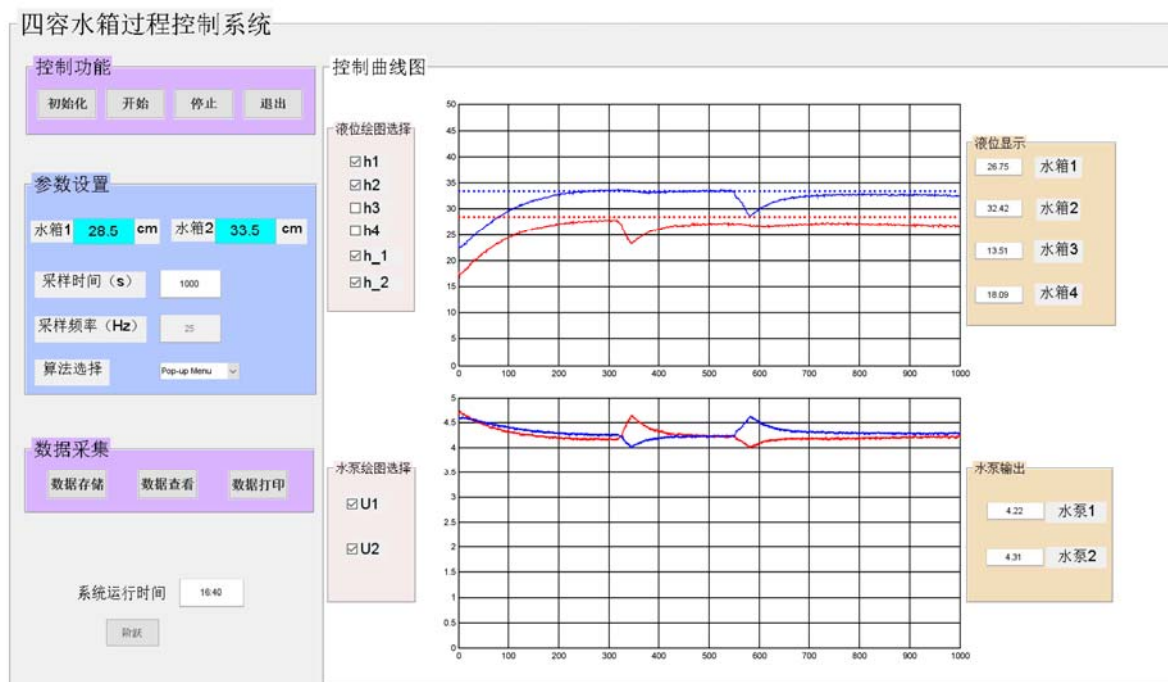


图 3.3 四容系统操作界面

3.2.2.1 控制功能区域

主要实现对系统的过程控制，包括初始化、开始、停止、退出等功能按钮。通过初始化功能将系统设置的参数写入注册表，并把实验装置的参数导入到 MATLAB 工作空间中；停止按钮即停止系统运行；退出按钮则是退出系统操作界面，并删除所设置的采样参数，但会自动保存采样数据。

3.2.2.2 数据采集功能区域

主要采集数据区域主要有数据存储、数据查看和打印数据功能按钮。数据存储通过 MATLAB 数据存储功能实现，可以保存为*.mat 文件，也可以保存为*.xls 文件。通过调用函数 uigetfile 和 uiputfile 获取用户的输入，并返回路径和文件名字符串。数据存储如图 3.4 所示。数据查看也是通过 MATLAB 操作界面打开文件夹实现查看功能。

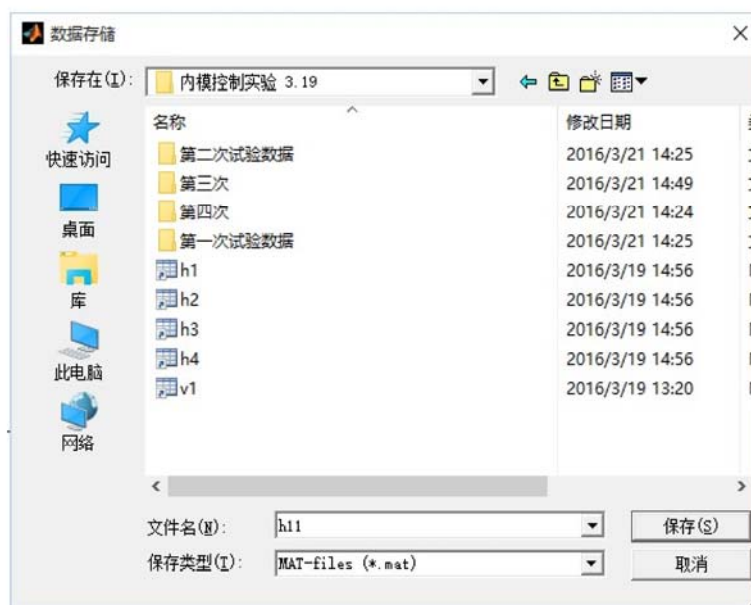


图 3.4 数据存储

3.2.2.3 图形显示区域

主要实现控制曲线图实时显示，便于观察系统控制过程。主要包括两个坐标轴、水箱的液位变化曲线复选框、液位高度数值显示、水泵流量变化曲线及数值显示等，通过复选框可实现对任意水箱液位变化曲线和水泵流量变化曲线进行显示。

3.2.2.4 参数设置区域

主要对数据采集卡的选择、采样时间、采样频率和液位参考值进行设置。通过算法选择下拉菜单栏可以对控制算法进行选择。

3.2.3 GUI 程序设计

要实现软件系统各个子模块的功能，首先要对各个控件的回调函数进行编程，当用户用鼠标或键盘选择或激活 GUI 界面的图形对象时，就会触发软件程序的回调函数，完成期望的功能。有两种方式可以对控件回调函数进行查看和编辑，一是通过单击 GUIDE 快捷菜单栏上的 M-file Edit 打开 M 文件，编写控件的回调函数。二是选择单个控件，单击鼠标右键打开菜单中的 View Callbacks 来对所选控件的回调函数进行编辑。我们对图 3.3 操作界面中的所有控件分别编写回调函数，对控件进行控制，实现其对应的功能。

为了提高软件系统的交互性能，我们在部分控件的回调函数中添加对话框。主要有三类对话框，一是文件名处理对话框，在单击数据保存或查看数据时，会弹出对话框；二是消息显示对话框，在对水箱液位参考值进行设定时，如果用户输入数值超过了水箱的高度，会弹出消息显示对话框，提示用户重新设定液位值；三是提问对话框，在鼠标单击开始、停止和退出按钮时，会弹出提问对话框，询问用户是否执行该功能。

3.3 数据采集模块

研华 PCI-1710U 数据采集卡在四容系统实验装置中主要作用是实现对水箱液位数据的采集以及对水泵流量的控制。要实现数据采集和控制功能，首先通过驱动软件 DAQNav i 对数据采集卡参数进行配置，编写接口程序实现数据采集卡与 MATLAB 软件通讯连接，通过编程控制调用 MATLAB 数据采集工具箱提供的命令和函数，实现数据的采集和控制量的输出。

3.3.1 数据采集卡参数配置

3.3.1.1 参数配置方式

DAQNav i 驱动提供的设备设置对话框允许用户对设备进行配置，然后将设置保存在系统注册表中。当用户调用 DAQNav i SDK 管理设备功能时，会使用这些设置。我们可以通过以下两种方式完成对数据采集卡设备的参数配置。一是通过 Advantech Navigator 进行配置。从开始菜单/所有程序/Advantech Automation/DAQNav i 中打开 Navigator，在 Navigator 界面中点击 Device Setting，打开设备设置界面，如图 3.5 所示。在设备设置界面中，用户可以根据自己的需要选择设备，对模拟量输入、模拟量输出、

数字量输入、数字量输出和计数器功能的参数进行设置。完成相应的复选框勾选之后，可单击“Save”按钮使设备设置生效并且将设备设置保存到系统注册表。如果“Update Device”和“Update System Database”均未勾选，则对话框一旦关闭，设备设置将丢失。

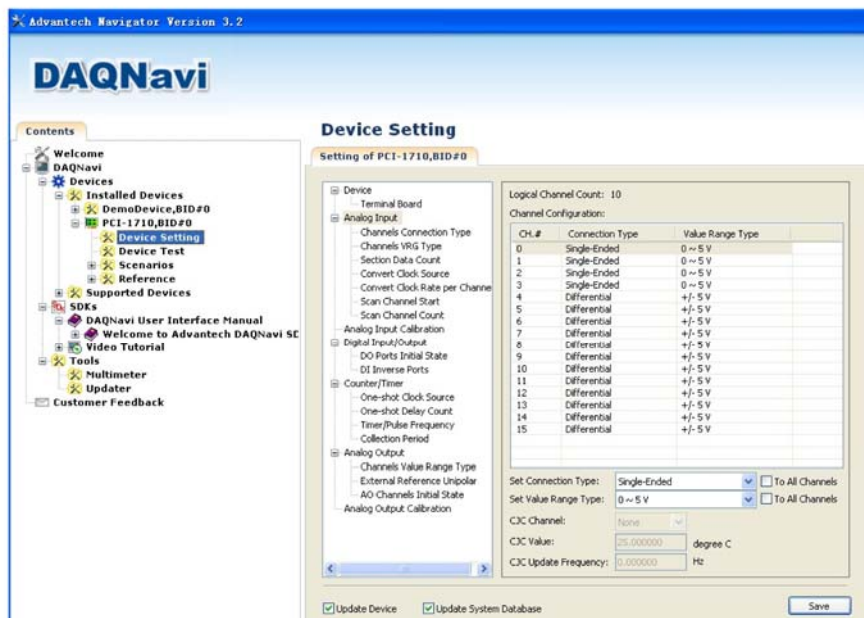


图 3.5 Advantech Navigator 设备设置界面

二是通过系统设备管理器进行配置。如果软件和硬件均成功安装，PCI-1710U 的设备名会出现在系统设备管理器中。在计算机的“Device Manager”窗口中，右击设备名称

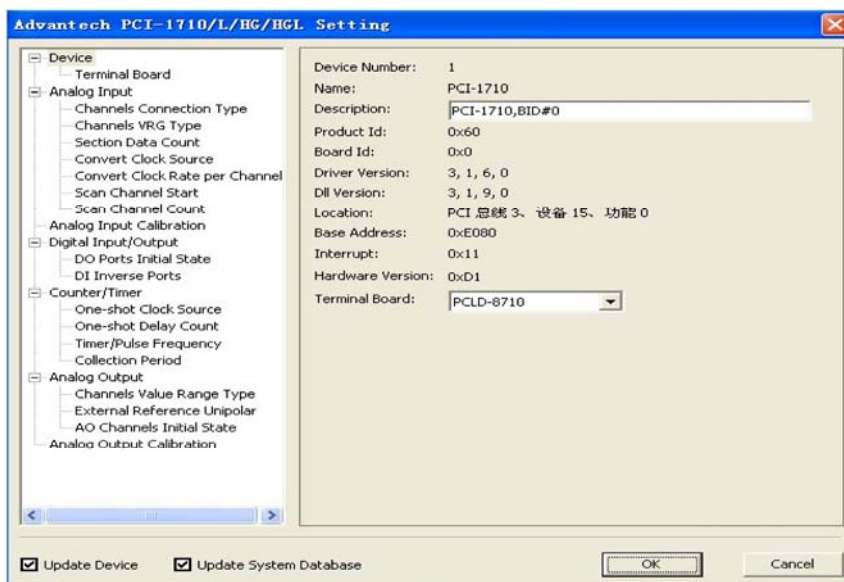


图 3.6 设备设置对话框

PCI-1710U 的“属性”选项，选择“Device Configuration”标签，PCI-1710U 设备驱动提供的设备设置对话框可供用户设置设备属性值，这些值将会保存在系统中。单击

“Configure”按钮对设备进行配置。如图 3.6 所示，在设备设置对话框中，用户可以选择更改设备模拟量输入/输出、数字量输入/输出和计数器功能的默认设置。

3.3.1.2 模拟量输入配置

根据四容系统模拟量输入的范围和接线方式，我们对数据采集卡模拟量输入通道进行配置，主要有以下五个步骤。

第一步：选择图 3.6 中的 Analog Input 菜单，打开对话框；

第二步：在 Connection Type 下拉列表框中选择通道连接类型，将每个通道的连接类型设置为“Single-ended”；

第三步：在 Value Range Type 下拉列表框中选择每个通道的取值范围类型，这里选择取值范围为“0-5V”；

第四步：在 Section Data Court 菜单下设置 Buffered AI 的块数据个数为 2048，设置 Buffered AI 的转换时钟源为内部时钟，设置 Buffered AI 的起始扫描通道为 0，扫描通道个数为 4；

第五步：勾选 Update Device 和 Update System Database 对话框，点击 Save 按钮，数据采集卡的输入参数配置设置完成。

3.3.1.3 模拟量输出配置

根据四容系统模拟量输出的要求，我们对模拟量输出通道进行配置，主要有以下三个步骤。

第一步：在 AO Channels' Value Range Type 下拉列表框中设置两个输出通道参考电压都为 0-5V；

第二步：设置 AO Channels' Initial State 两个初始状态都为 0；

第三步：勾选 Update Device 和 Update System Database 对话框，点击 Save 按钮，数据采集卡的输出参数配置设置完成。

3.3.2 DAQNav i 在 MATLAB 中的应用

四容系统实验装置软件系统功能的实现是基于 MATLAB 软件，数据采集卡驱动 DAQNav i 提供了两种 MATLAB 编程方式来实现数据采集与输出。

1. M 文件形式。DAQNav i SDK 提供了完整的 M 文件例程。包括模拟量输入、模拟量输出、数字量输入、数字量输出、定时器等，用户可以根据需要依据例程编写想要实

现的功能。

2. Simulink 方式。Simulink 是 MATLAB 最重要的组件之一，它向用户提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境，用户无需书写大量的程序，而只需通过简单直观的鼠标操作，选取适当的库模块，就可构造出复杂的仿真模型^[38]。目前采用 Simulink 进行数据采集，仅支持 Instant AI、InstantAO、StaticDI 和 StaticDO 四种方式，且不支持高速功能。

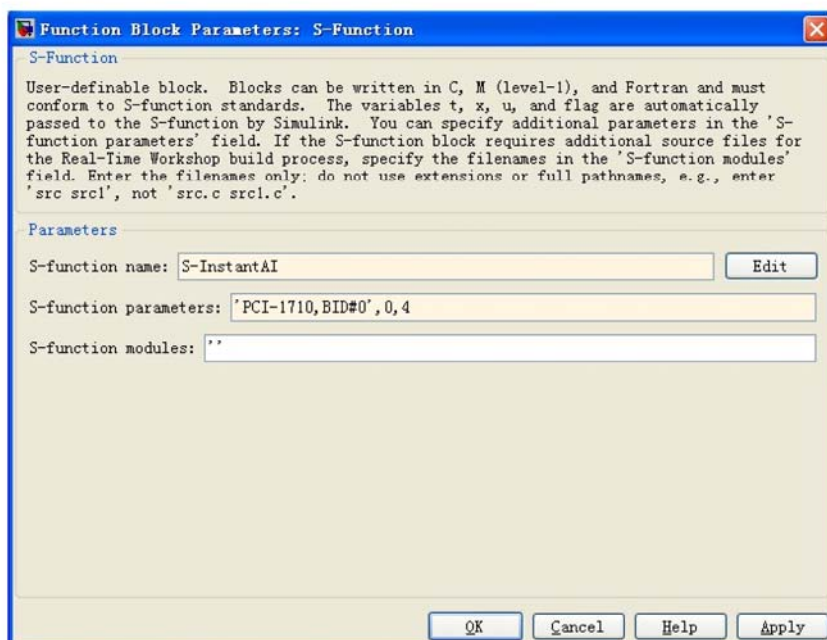


图 3.7 s-Function 参数设置

Simulink 方式实现主要有以下几个步骤。

- (1) 打开 Simulink 模块库浏览器，新建空白模型窗口；
- (2) 将 User-Defined Function\s-Function 拖进模型窗口；
- (3) 双击 s-Function 设置参数，如图 3.8 所示。以上参数表示使用 InstantAI/InstantAO 功能，s-Function parameters 的内容表示使用 PCI-1710 数据采集卡，开始通道为 0，连续读取 4 个通道。

(4) 修改 Simulation 菜单下的 Configuration Parameters 的 Solver 属性。Solver 需要选择离散状态；用户可根据需要自行设定仿真时间和最大步长。

3.3.3 数据采集功能实现

编写数据 MATLAB 数据采集程序，以实现数据采集卡对数据的采集和输出。数据采集程序和模拟量输出程序如下。

数据采集程序

```
>> function [A]=AIn(readAI,data,startChannel,channelCount)
% A为双精度矩阵,用于存放数据,列数为通道个数
>>BDaq = NET.addAssembly('Automation.BDaq');
%使MATLAB识别数据采集卡
>>deviceDescription = 'PCI-1710,BID#0'; %打开数据采集卡设备
>>startChannel = int32(0);%选择开始通道
>>channelCount = int32(4);%选择通道数目
>>readAI(startChannel, channelCount, data); %读取数据
>> for j=0:(channelCount - 1)
>>  A(j+1,1) = data(j+1);
>>  end
>> end
```

模拟量输出程序

```
>> function AOut(funWrite,channelStart,channelCount,...
                scaleData,valchan)
>> % 模拟量输出函数
>>BDaq = NET.addAssembly('Automation.BDaq');
%使MATLAB识别数据采集卡
>>deviceDescription = 'PCI-1710,BID#0';%打开数据采集卡设备
>>channelStart = int32(0);%选择开始通道
>>channelCount = int32(2);%输出通道数目
>>scaleData(1)=valchan(1);%通道0的值
>>scaleData(2)=valchan(2);%通道1的值
>>funWrite(channelStart, channelCount, scaleData);%写入数据
>> end
```

通过以上程序我们就可以实现数据采集卡数据采集和控制量的输出。

3.4 图形显示模块

四容系统过程控制曲线图可以通过 GUI 的操作界面实现,主要包括水箱液位变化曲线和水泵流量变化曲线。通过操作界面上复选框按钮可以对想要显示的曲线图进行显示。图形显示模块还对液位高度和水泵流量进行实时的数值显示。液位变化曲线显示程

序如下。

液位变化曲线显示程序

```
>> axes(handles.axes1);
>> xh1=plot(0:n-1,High(1,1:n),'r');
>> if get(handles.disph1,'Value')==1
    set(xh1,'Visible','on'); %设置液位h1曲线可见
    else
    set(xh1,'Visible','off'); %设置液位h1曲线隐藏
>> end
>> xh2=plot(0:n-1,High(2,1:n),'b');
>> if get(handles.disph2,'Value')==1
    set(xh2,'Visible','on'); %设置液位h2曲线可见
    else
    set(xh2,'Visible','off'); %设置液位h2曲线隐藏
    end
>>xh3=plot(0:n-1,High(3,1:n),'g');
    if get(handles.disph3,'Value')==1
        set(xh3,'Visible','on'); %设置液位h3曲线可见
    else
        set(xh3,'Visible','off');%设置液位h3曲线隐藏
    end
>>xh4=plot(0:n-1,High(4,1:n),'k');
    if get(handles.disph4,'Value')==1
        set(xh4,'Visible','on'); %设置液位h4曲线可见
    else
        set(xh4,'Visible','off'); %设置液位h4曲线隐藏
    end
>> drawnow;%画图
```

3.5 模拟信号的标度变换

生产过程中的各个被测参数都有着不同的量纲，例如压力的单位是 Pa，温度的单位是℃，流量的单位是 m³/h 等，但它们经测量硬件的采集后转换为数字量，只对应被测工程量参数值的大小，并不是原来带有量纲的参数值。而控制系统中的检测和监控装

置一般都要求按被测量的工程单位进行显示、打印等。因此将对应参数值的大小转换成能直接显示有量纲的工程量数值，被称为标度变换，也称为工程转换^[32]。

在四容系统实验装置设计中，我们需要确定水箱液位高度与液位传感器输出电压数值、水泵输入电压数值与水泵流量的数学关系。我们在获取大量实验数据的基础上，通过 MATLAB 曲线拟合的方法得到他们之间的数学关系式。

3.5.1 液位传感器信号的标度变换

水箱 1 液位传感器采样数据如表 3.1

表 3.1 水箱 1 液位传感器采样数据

液位高度 $h_1(\text{cm})$	电压 $u_1(\text{V})$	液位高度 $h_1(\text{cm})$	电压 $u_1(\text{V})$	液位高度 $h_1(\text{cm})$	电压 $u_1(\text{V})$	液位高度 $h_1(\text{cm})$	电压 $u_1(\text{V})$
0	0.22	14	0.77	28	1.34	42	1.92
1	0.24	15	0.82	29	1.38	43	1.96
2	0.28	16	0.86	30	1.42	44	2.00
3	0.32	17	0.90	31	1.46	45	2.04
4	0.37	18	0.94	32	1.51	46	2.08
5	0.41	19	0.98	33	1.55	47	2.13
6	0.45	20	1.02	34	1.59	48	2.17
7	0.49	21	1.06	35	1.63	49	2.21
8	0.53	22	1.10	36	1.68	50	2.25
9	0.58	23	1.15	37	1.72	51	2.29
10	0.62	24	1.19	38	1.76	52	2.33
11	0.65	25	1.22	39	1.80	53	2.37
12	0.70	26	1.26	40	1.84	54	2.41
13	0.73	27	1.30	41	1.88	55	2.46

水箱 2 液位传感器采样数据如表 3.2

表 3.2 水箱 2 液位传感器采样数据

液位高度 $h_2(\text{cm})$	电压 $u_2(\text{V})$	液位高度 $h_2(\text{cm})$	电压 $u_2(\text{V})$	液位高度 $h_2(\text{cm})$	电压 $u_2(\text{V})$	液位高度 $h_2(\text{cm})$	电压 $u_2(\text{V})$
0	0.18	14	0.74	28	1.31	42	1.89

续表

液位高度 $h_2(\text{cm})$	电压 $u_2(\text{V})$	液位高度 $h_2(\text{cm})$	电压 $u_2(\text{V})$	液位高度 $h_2(\text{cm})$	电压 $u_2(\text{V})$	液位高度 $h_2(\text{cm})$	电压 $u_2(\text{V})$
1	0.21	15	0.78	29	1.36	43	1.94
2	0.25	16	0.82	30	1.40	44	1.98
3	0.29	17	0.87	31	1.44	45	2.02
4	0.33	18	0.91	32	1.48	46	2.06
5	0.37	19	0.95	33	1.52	47	2.11
6	0.42	20	0.99	34	1.56	48	2.15
7	0.46	21	1.03	35	1.61	49	2.18
8	0.50	22	1.07	36	1.64	50	2.23
9	0.54	23	1.11	37	1.69	51	2.27
10	0.58	24	1.15	38	1.73	52	2.31
11	0.61	25	1.20	39	1.77	53	2.35
12	0.66	26	1.23	40	1.81	54	2.39
13	0.70	27	1.28	41	1.85	55	2.43

水箱 3 液位传感器采样数据如表 3.3

表 3.3 水箱 3 液位传感器采样数据

液位高度 $h_3(\text{cm})$	电压 $u_3(\text{V})$	液位高度 $h_3(\text{cm})$	电压 $u_3(\text{V})$	液位高度 $h_3(\text{cm})$	电压 $u_3(\text{V})$	液位高度 $h_3(\text{cm})$	电压 $u_3(\text{V})$
0	0.09	14	0.56	28	1.15	42	1.74
1	0.10	15	0.60	29	1.19	43	1.79
2	0.11	16	0.65	30	1.23	44	1.83
3	0.13	17	0.69	31	1.27	45	1.87
4	0.16	18	0.73	32	1.31	46	1.92
5	0.20	19	0.77	33	1.36	47	1.96
6	0.23	20	0.81	34	1.40	48	2.00
7	0.27	21	0.85	35	1.44	49	2.04
8	0.32	22	0.89	36	1.49	50	2.09
9	0.36	23	0.93	37	1.53	51	2.14
10	0.40	24	0.98	38	1.57	52	2.18

续表

液位高度 $h_3(\text{cm})$	电压 $u_3(\text{V})$	液位高度 $h_3(\text{cm})$	电压 $u_3(\text{V})$	液位高度 $h_3(\text{cm})$	电压 $u_3(\text{V})$	液位高度 $h_3(\text{cm})$	电压 $u_3(\text{V})$
11	0.43	25	1.02	39	1.62	53	2.22
12	0.48	26	1.06	40	1.66	54	2.27
13	0.52	27	1.11	41	1.70	55	2.33

水箱4液位传感器采样数据如表3.4

表3.4 水箱4液位传感器采样数据

液位高度 $h_4(\text{cm})$	电压 $u_4(\text{V})$	液位高度 $h_4(\text{cm})$	电压 $u_4(\text{V})$	液位高度 $h_4(\text{cm})$	电压 $u_4(\text{V})$	液位高度 $h_4(\text{cm})$	电压 $u_4(\text{V})$
0	0.26	14	0.81	28	1.39	42	1.96
1	0.28	15	0.85	29	1.43	43	2.00
2	0.32	16	0.89	30	1.47	44	2.04
3	0.36	17	0.93	31	1.50	45	2.08
4	0.40	18	0.97	32	1.55	46	2.12
5	0.44	19	1.02	33	1.59	47	2.16
6	0.48	20	1.05	34	1.63	48	2.20
7	0.52	21	1.10	35	1.67	49	2.25
8	0.57	22	1.14	36	1.71	50	2.29
9	0.61	23	1.18	37	1.75	51	2.33
10	0.65	24	1.22	38	1.79	52	2.37
11	0.68	25	1.26	39	1.84	53	2.41
12	0.73	26	1.30	40	1.88	54	2.45
13	0.77	27	1.34	41	1.92	55	2.49

MATLAB 提供了多项式拟合函数，可以用来做线性或者非线性曲线拟合。拟合函数为 $p = \text{polyfit}(x, y, m)$ ，其中 x, y 是输入参数，表示输入值和输出值； m 为拟合多项式的次数，当 $m = 1$ 时，为线性拟合。在本实验装置中采用线性拟合，即 $m = 1$ 。

求解多项式拟合的测试函数为 $y_1 = \text{polyval}(p, x_1)$ ，其中 x_1 测试数据矢量， y_1 为多项式

拟合曲线的输出矢量。

MATLAB 线性拟合程序如下。

MATLAB 线性拟合程序
<pre> >> x = [0.22 0.24 0.28 0.32 0.37 0.41 0.45 0.49 0.53 0.58 0.62 0.65 0.70 0.73 0.77 0.82 0.86 0.90 0.94 0.98 1.02 1.06 1.10 1.15 1.19 1.22 1.26 1.30 1.34 1.38 1.42 1.46 1.51 1.55 1.59 1.63 1.68 1.72 1.76 1.80 1.84 1.88 1.92 1.96 2.00 2.04 2.08 2.13 2.17 2.21 2.25 2.29 2.33 2.37 2.41 2.46 2.50]; >> y = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56]; >> plot(x,y,'k.','markersize',15); >> axis([0 2.8 0 60]); >> p=polyfit(x,y,1); >> t=0:0.1:2.5; >> s=polyval(p,t); >> hold on; >> plot(t,s,'r-','linewidth',2); >> xlabel('u(v)');ylabel('h(cm)'); >> grid; </pre>

通过以上程序我们就可以获得液位高度与输出电压之间的数学关系表达式。

水箱 1: $h_1=24.4552*u_1-4.9674$

水箱 2: $h_2=24.2996*u_2-4.0499$

水箱 3: $h_3=24.3059*u_3-3.3717$

水箱 4: $h_4=24.4156*u_4-5.8083$

其中 h_i , $i=1,2,3,4$ 表示液位高度, u_j , $j=1,2,3,4$ 表示输出电压, 液位传感器曲线拟合图如图 3.8 所示。

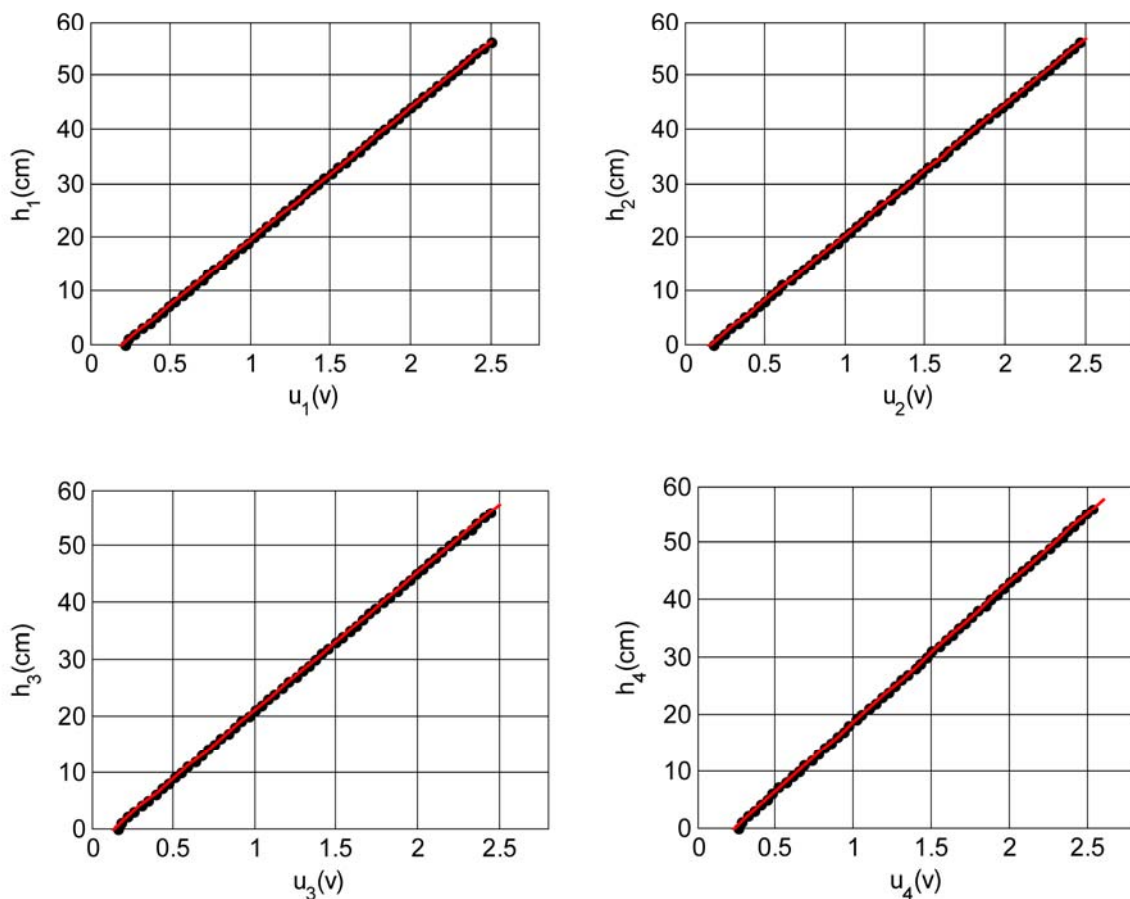


图 3.8 液位传感器曲线拟合图

3.5.2 水泵控制信号的标度变换

水泵 1 的流量 Q_1 与电压 u_1 实验数据如表 3.5 所示。

表 3.5 水泵 1 的流量与电压实验数据

电压 u_1 (V)	流量 Q_1 (cm^3/s)	电压 u_1 (V)	流量 Q_1 (cm^3/s)	电压 u_1 (V)	流量 Q_1 (cm^3/s)	电压 u_1 (V)	流量 Q_1 (cm^3/s)
0.60	5.590	1.80	56.835	3.00	104.970	4.20	159.036
0.70	9.832	1.90	60.899	3.10	109.543	4.30	159.516
0.80	15.747	2.00	65.104	3.20	112.580	4.40	166.037
0.90	21.446	2.10	68.217	3.30	116.556	4.50	168.152
1.00	26.386	2.20	73.333	3.40	122.222	4.60	174.257
1.10	30.949	2.30	77.419	3.50	126.923	4.70	177.777
1.20	34.086	2.40	82.243	3.60	128.780	4.80	184.615
1.30	38.681	2.50	88.294	3.70	134.693	4.90	184.615

续表

电压 u_1 (V)	流量 Q_1 (cm^3/s)	电压 u_1 (V)	流量 Q_1 (cm^3/s)	电压 u_1 (V)	流量 Q_1 (cm^3/s)	电压 u_1 (V)	流量 Q_1 (cm^3/s)
1.40	42.477	2.60	92.307	3.80	137.142	5.00	185.915
1.50	45.205	2.70	98.507	3.90	144.262		
1.60	48.351	2.80	102.127	4.00	149.152		
1.70	52.800	2.90	103.529	4.10	151.724		

水泵 2 的流量 Q_2 与电压 u_2 的实验数据如表 3.6 所示。

表 3.6 水泵 2 的流量与电压的实验数据

电压 u_2 (V)	流量 Q_2 (cm^3/s)	电压 u_2 (V)	流量 Q_2 (cm^3/s)	电压 u_2 (V)	流量 Q_2 (cm^3/s)	电压 u_2 (V)	流量 Q_2 (cm^3/s)
0.60	8.01	1.80	57.38	3.00	106.75	4.20	156.13
0.70	12.12	1.90	61.49	3.10	110.87	4.30	160.24
0.80	16.23	2.00	65.61	3.20	114.98	4.40	164.35
0.90	20.34	2.10	69.72	3.30	119.09	4.50	168.47
1.00	24.46	2.20	73.84	3.40	123.21	4.60	172.53
1.10	28.58	2.30	77.95	3.50	127.33	4.70	176.21
1.20	32.69	2.40	82.07	3.60	131.44	4.80	180.11
1.30	36.81	2.50	86.18	3.70	135.55	4.90	180.23
1.40	40.92	2.60	90.29	3.80	139.67	5.00	180.24
1.50	45.04	2.70	94.41	3.90	143.79		
1.60	49.15	2.80	92.53	4.00	147.89		
1.70	53.26	2.90	102.64	4.10	152.02		

同样，用 MATLAB 命令进行曲线拟合，得到水泵的输入电压与流量之间的数学关系表达式如下。

$$\text{水泵 1: } Q_1=41.1428*u_1-16.5592$$

$$\text{水泵 2: } Q_2=41.1199*u_2-17.0442$$

其中 Q_1 、 Q_2 分别表示水泵 1 和水泵 2 的流量， u_1 、 u_2 分别表示水泵 1 和水泵 2 的电压。

水泵拟合曲线图如图 3.9 所示。

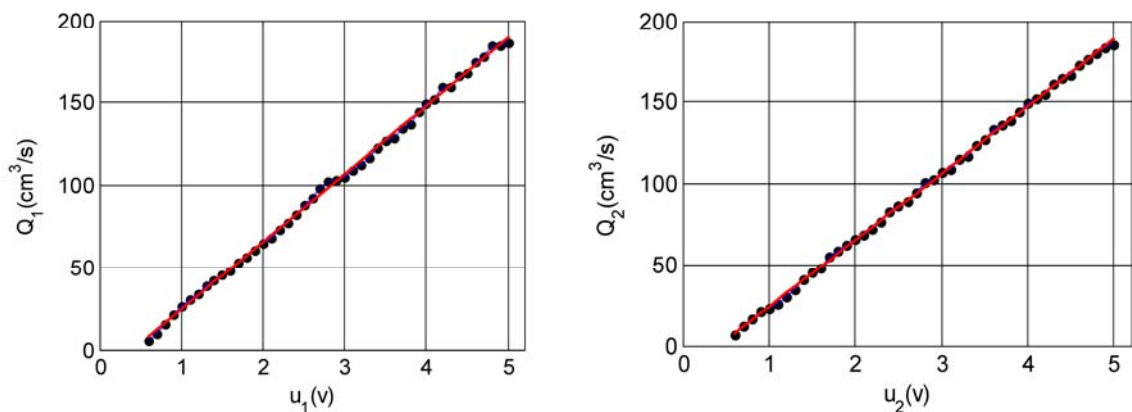


图 3.9 水泵拟合曲线图

3.6 本章小结

本章主要完成了四容水箱液位控制系统实验装置的软件系统设计。本装置的软件系统是基于 MATLAB 环境，采用模块化设计。本章首先对软件系统的组成部分及实现的功能进行了介绍。然后介绍了 MATLAB/GUI 开发环境及用户操作界面功能实现，对数据采集模块、图形显示模块功能实现及程序开发进行了研究，最后完成了传感器和水泵的标度变换，得到了液位高度、水泵流量与电压的数学关系式。

第 4 章 四容系统数学模型

4.1 四容系统工作原理

四容系统是由四个相互关联的水箱组成，配合检测机构、执行机构和多个阀门实现系统的控制功能。四容系统物理模型示意图在第 1 章图 1.3 已经给出。

水箱 1、水箱 2、水箱 3、水箱 4 和底部的水槽是用来蓄水的容器。四个水箱底部都装有用来检测液位高度的液位传感器。可调节水泵 1 和 2 用来控制回路水流量的大小，其中水泵 1 分别给水箱 1 和水箱 4 供水，水泵 2 分别给水箱 2 和水箱 3 供水。四个水箱下面各有一个出水孔，水箱 3 流出的水注入水箱 1 中，水箱 4 流出的水注入水箱 2 中，水箱 1、水箱 2 流出的水直接流入底部的水槽中。在每个水箱的进水管和出水管上都装有一个可手动调节的阀门，用来调节出水流量，从而改变水箱特性。另外每个水箱顶部都装有溢流管道，用来保证在水箱液位达到最大值时经由它流至底部水槽中，以防止水箱里的水溢出。水箱 1 和水箱 2 底部侧面装有手动阀，可以设置水箱漏水故障点。整个系统通过聚乙烯材料软管连接起来，底部的蓄水箱为其上面的四个水箱提供水源。水泵的供水管路上装有比例分流阀，可以通过调节比例分流阀的开度调节两个水箱流量分配比例，实现系统在最小相位和非最小相位的转换。

四容系统是一个典型的时滞、非线性、多输入多输出、耦合的过程控制对象。采用该对象可以进行非线性控制、解耦控制、多变量控制和故障诊断与容错控制等实验，可以验证多种复杂的先进控制与优化算法。该平台采用 MPX5010DP 差压传感器作为检测机构，具有测量准确，量测噪声小，线性度高等优点；采用直流调压水泵作为执行机构，具有调节速度快，系统时滞小，控制准确等优点。

4.2 四容系统数学模型

四容系统是通过控制水泵的电压调节进入水箱的水流量，最终达到控制下面水箱的液位高度。控制量为水泵电压 v ，被控量为水箱 1，水箱 2 的液位高度 h_1 和 h_2 。

设定： u_1 为水泵 1 输入电压（通过控制水泵 1 的控制电压，控制水泵 1 的水流量）。 u_2 为水泵 2 输入电压（通过控制水泵 2 的控制电压，控制水泵 2 的水流量）。 h_i 是水箱 i 的液位高度，在本实验装置中 $0 \leq h_i \leq 60$ ， $i=1,2,3,4$ 。

根据四容系统工作原理可以知道水泵 1 输入电压 u_1 的变化影响液位 h_1 和 h_2 ，同样，水泵 2 输入电压 u_2 的变化影响液位 h_1 和 h_2 ，所以四容系统是个典型的多输入多输出的耦合系统。对于每一个水箱，根据动态物料平衡关系 $A \frac{dh}{dt} = q_{in} - q_{out}$ 来建立系统数学模型，其中 A 为水箱横截面积； q_{in} 和 q_{out} 为该水箱的进水流量和出水流量； h 为液位高度。

在四容系统中，假设水泵 1 的水流量为 Q_1 ，水泵 2 的水流量为 Q_2 ； γ_1 表示水泵 1 进入水箱 1 和水箱 4 流量比，即水泵 1 进入水箱 1 的流量为 $\gamma_1 * Q_1$ ，则水泵 1 注入水箱 4 的流量就为 $(1-\gamma_1) * Q_1$ ；同样 γ_2 表示水泵 2 进入水箱 2 和水箱 3 流量比，水泵 2 流入水箱 2 的流量为 $\gamma_2 * Q_2$ ，水泵 2 注入水箱 3 的流量就为 $(1-\gamma_2) * Q_2$ 。其中 $\gamma_i \in [0,1], i=1,2$ 。我们可以得出四容系统的动态平衡方程如下：

$$\begin{aligned} A_1 \frac{dh_1}{dt} &= \gamma_1 Q_1 + Q_{31} - Q_{10} \\ A_2 \frac{dh_2}{dt} &= \gamma_2 Q_2 + Q_{42} - Q_{20} \\ A_3 \frac{dh_3}{dt} &= (1-\gamma_2) Q_2 - Q_{31} \\ A_4 \frac{dh_4}{dt} &= (1-\gamma_1) Q_1 - Q_{42} \end{aligned} \quad (4.1)$$

在式 (4.1) 中， A_i 和 h_i 分别为 i ($i=1,2,3,4$) 号水箱的截面积和液位高度值， Q_{kj} 为 k ($k=1,2,3,4$) 号水箱到 j ($j=0,1,2$) 号水箱的流量，0 号水箱表示底部水槽。

根据伯努利方程可以得到四容系统的非线性方程表达式^[33]如下：

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1}{A_1} Q_1 - \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} \\ \frac{dh_2}{dt} &= \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2}{A_2} Q_2 - \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} \\ \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{1-\gamma_2}{A_3} Q_2 \\ \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{1-\gamma_1}{A_4} Q_1 \end{aligned} \quad (4.2)$$

在式 (4.2) 中， a_i 为 i ($i=1,2,3,4$) 号水箱底部出水孔截面积； g 是重力加速度。由式 (4.2) 可见，液位高度和水流量呈非线性关系。

设四容系统的平衡点为 $(h_1^0, h_2^0, h_3^0, h_4^0, Q_1^0, Q_2^0)$ ，定义变量 $x_i = h_i - h_i^0$ ， $\hat{u}_j = Q_j - Q_j^0$ ，这里 $i=1,2,3,4$ ， $j=1,2$ 。将系统在平衡点处线性化展开，其状态空间表达式如下：

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2}{A_3} \\ 0 & \frac{1-\gamma_2}{A_3} \\ \frac{1-\gamma_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} \hat{u} \quad (4.3)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x$$

上式中 $T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}$ ， $i=1,2,3,4$ 。

系统过程动态传递函数矩阵为

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{T_1 \gamma_1}{A_1(1+sT_1)} & \frac{T_1(1-\gamma_2)}{A_1(1+sT_3)(1+sT_1)} \\ \frac{T_2(1-\gamma_1)}{A_2(1+sT_4)(1+sT_2)} & \frac{T_2 \gamma_2}{A_2(1+sT_2)} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

在 3.5.2 节我们已经得到水泵控制电压 u_1 和水泵流量 Q_1 ， u_2 和 Q_2 数学关系，

$$\begin{aligned} Q_1 &= 41.1428 * u_1 - 16.5592 \\ Q_2 &= 41.1199 * u_2 - 17.0442 \end{aligned} \quad (4.5)$$

式 (4.5) 写成矩阵的形式如下：

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 41.1428 & 0 \\ 0 & 41.1199 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 16.5592 \\ 17.0442 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

作为双输入双输出系统，这里以水泵1和水泵2的电压控制量 u_1 、 u_2 分别作为输入量，水箱1和水箱2的液位高度值 y_1 、 y_2 作为输出量，其中水泵1对水箱1、水箱2的控制传递函数分别为 $G_{11}(s)$ 、 $G_{21}(s)$ ，水泵2对水箱1、水箱2的传递函数分别为 $G_{12}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 。其对象的传递函数矩阵可写成

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

四容系统实验装置模型参数如表 4.1 所示

表 4.1 四容系统模型参数

a_1, a_2	0.503 cm^2	γ_1	0.5327
a_3, a_4	0.283 cm^2	γ_2	0.5485
A_1, A_2, A_3, A_4	176.33 cm^2	g	981 cm/s^2

4.3 四容系统参数辨识

4.3.1 阶跃响应法系统辨识

阶跃响应法系统辨识就是在被辨识对象上施加一个阶跃扰动信号，然后测定出对象的响应随时间变化的曲线，根据该响应曲线，通过图解和计算的方法，利用响应曲线上少量特征参数推算出传递函数的参数^[34]。对象的阶跃响应曲线直接来自实验的记录曲线，能够形象直观的描述被控过程的动态特性，是一种常用的方法。

利用阶跃响应曲线来确定典型工业过程传递函数的方法很多，常用的有近似法、半对数法、切线法、两点法和面积法等^[35]。由阶跃响应求出传递函数，首先要选定模型传递函数的形式，再确定具体参数。过程控制中，对象在扰动作用破坏其平衡工况后，在没有操作人员或调节器的干预下，自动恢复平衡的特性称为自衡特性，相应的对象称为自衡对象^[36]。在工业生产中，大多数过程都是有自衡能力的非振荡衰减过程，其传递函数可以用一阶惯性环节加滞后、二阶惯性环节加滞后或 n 阶惯性环节加滞后三种形式来描述

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (4.8)$$

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (4.9)$$

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(Ts + 1)^n} \quad (4.10)$$

四容系统作为自衡对象，在给定阶跃变化之后，系统能够达到一个稳定的状态。在 4.2 节我们已经确定了四容系统传递函数形式，考虑执行机构的延迟，水泵 1 对液位 1，

水泵 2 对液位 2 的传递函数可用带时滞的一阶惯性环节表示, 即 $G_1(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1}$ 。水泵 1

对液位 2, 水泵 2 对液位 1 的传递函数可用二阶惯性加滞后环节表示, 即

$$G_2(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$$

。通过阶跃响应法能够求解系统传递函数的参数。

4.3.1.1 一阶惯性加滞后环节的参数辨识

若被控过程的响应曲线呈 S 形时, 如图 4.1 所示。该对象可用带纯滞后的一阶非周期环节来描述, 其传递函数的结构形式为

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} \tag{4.11}$$

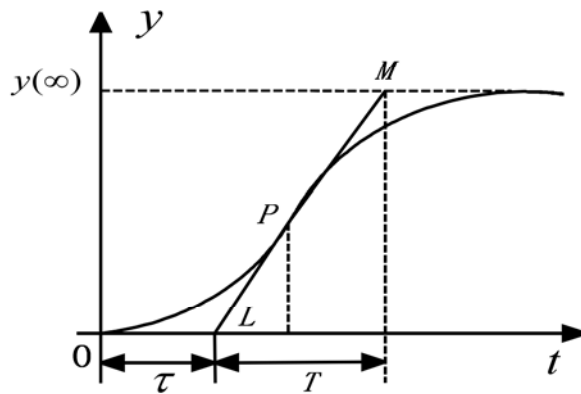


图 4.1 一阶惯性滞后环节的辨识

传递函数中的放大系数 K 为输出稳态值 $y(\infty)$ 与阶跃输入幅值 Δu 之比

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u} \tag{4.12}$$

被控过程时间常数 T 与滞后时间 τ 可以采用作图法求解。通过响应曲线的拐点 P 作切线 LPM 。切线与时间轴交于 L 点, 与稳态值的渐近线交于 M 点。 oL 即为该对象的纯滞后时间 τ , 切线 LPM 在时间轴上的投影即为时间常数 T 。

4.3.1.2 二阶惯性加滞后环节的参数辨识

对于具有传递函数 $G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$ 的系统, 静态放大系数 K 仍可用式 (4.12)

计算。纯滞后时间 τ 可根据阶跃响应曲线开始变化的时刻来确定, 如图 4.2 所示。在图

4.2 的时间轴上截去 τ ，化为无量纲形式的阶跃响应 $y^*(t)$ 。

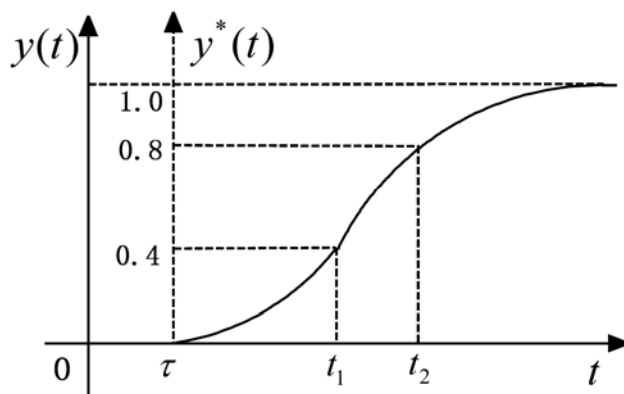


图 4.2 二阶滞后环节参数辨识

式 (4.9) 去除纯滞后 τ 并化为无量纲形式后，可用下式表示

$$G(s) = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (T_1 > T_2) \quad (4.13)$$

与式 (4.13) 对应的无量纲阶跃响应曲线为

$$y^*(t) = 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (4.14)$$

或

$$1 - y^*(t) = \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (4.15)$$

根据式 (4.14) 或者 (4.15)，可以利用阶跃响应曲线上两个点的数据 $[t_1, y^*(t_1)]$ 、 $[t_2, y^*(t_2)]$ 确定 T_1 和 T_2 ，一般可选取 $y^*(t_1) = 0.4$ ， $y^*(t_2) = 0.8$ 两个点，再从曲线上确定对应的 t_1 和 t_2 ，如图 4.2 所示，即可得到方程组

$$\begin{cases} \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t_1}{T_1}} - \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t_1}{T_2}} = 0.6 \\ \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t_2}{T_1}} - \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t_2}{T_2}} = 0.2 \end{cases} \quad (4.16)$$

从式 (4.16) 可以求出近似解

$$\begin{cases} T_1 + T_2 \approx \frac{1}{2.16}(t_1 + t_2) \\ \frac{T_1 T_2}{(T_1 + T_2)^2} \approx (1.74 \frac{t_1}{t_2} - 0.55) \end{cases} \quad (4.17)$$

当 $0.32 < t_1/t_2 < 0.46$ 时, 被控过程 $y^*(t)$ 可近似为二阶惯性环节, 时间常数 T_1 和 T_2 可以由式 (4.16) 或式 (4.17) 求出。

当 $t_1/t_2 < 0.32$ 时, 被控过程数学模型可近似为一阶惯性环节。

当 $t_1/t_2 = 0.32$ 时, 被控过程数学模型可近似为一阶惯性环节, 时间常数为 $T_1 = \frac{t_1 + t_2}{2.12}$, $T_2 = 0$ 。

当 $t_1/t_2 = 0.46$ 时, 被控过程数学模型可近似为 $G(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^2}$, 时间常数为

$$T_1 = T_2 = \frac{t_1 + t_2}{2 \times 2.18}。$$

当 $t_1/t_2 > 0.46$ 时, 被控过程数学模型应用高于二阶的环节近似, 即 $G(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^n}$,

时间常数为 $T \approx \frac{t_1 + t_2}{2.16n}$ 。

4.3.2 四容系统参数辨识

MATLAB 软件提供了功能强大的系统辨识工具箱, 支持非参数和参数模型类的辨识。我们通过系统辨识工具箱的图形界面工具, 实现四容系统传递函数的参数辨识。

4.3.2.1 四容系统阶跃响应

由式 (4.7) 可知四容系统的传递函数矩阵为 $\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$, 通过阶跃响应

法对四容系统进行辨识即可得到相应的传递函数 G_{11} 、 G_{21} 、 G_{12} 、 G_{22} 的参数。首先将所有阀门调整到合适的开度并保持不变, 给定水泵 1 和水泵 2 的输入量 u_1 和 u_2 都为 $3.4V$, 在系统运行一定时间之后, 使得水位保持在一定的高度, 即对象处于稳定状态, 这时液位高度值 $h_1 = 19.2, h_2 = 17.8, h_3 = 19, h_4 = 14.8$ 。保持水泵 2 给定值不变, 将水泵 1 的给

定值以阶跃方式调节到 $4.2V$ ，等到水箱内的液位再次趋于一个稳定位置时，利用 GUI 操作界面的数据存储功能将采集到的数据保存下来，这样我们就完成了第一组数据的采集，通过这组数据我们可以辨识出传递函数 G_{11} 、 G_{21} 的参数。再次将水泵 1 的给定值恢复到 $3.4V$ ，使系统再次达到平衡状态。保持水泵 1 的给定值不变，将水泵 2 的给定值以阶跃方式调节到 $4.2V$ ，随着时间的推移，系统又达到一个稳定状态，将采集的数据保存下来。用得到的第二组数据来辨识传递函数 G_{12} 、 G_{22} 的参数。利用 GUI 操作界面的数据查询功能，找到实验数据并导出，保存文件类型为 *.mat。

4.3.2.2 四容系统参数辨识

我们通过 MATLAB 系统辨识工具箱对四容系统被控对象进行参数辨识。MATLAB 系统辨识工具箱工作界面如图 4.5 所示。首先点击 import data(导入数据) 下拉菜单，选择时域数据，弹出 import data 的对话框，如图 4.6 所示。将第一次采集的数组经过处理后导入到辨识工具箱的数据浏览窗口，导入数据时要对数据的采样时间进行设定；然后对导入的数组进行 Remove trend（去除趋势）、Remove mean（去除均值）、Filter（滤波）等预处理；把预处理过的数据拖到 Working Data（工作数据）工作区，把验证的数据拖到 Validation Data（验证数据）工作区，选择 Estimate（估计）中的 Process Model（过程模型）进行辨识。Process Model 的模型包含增益 K、极点个数选择、零点选择、

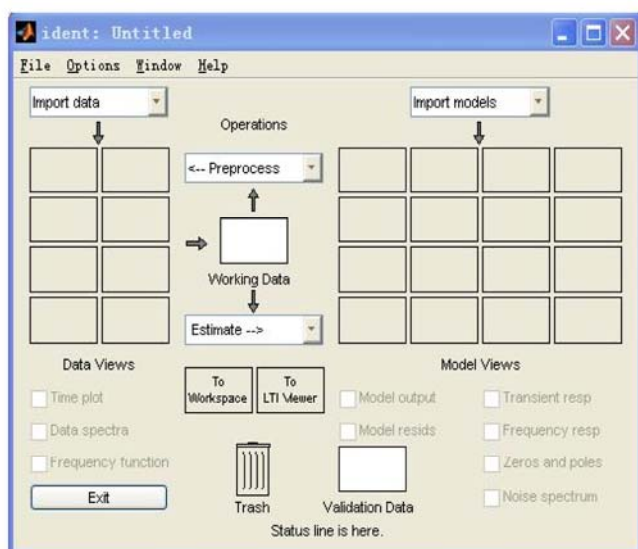


图 4.5 系统辨识工具箱

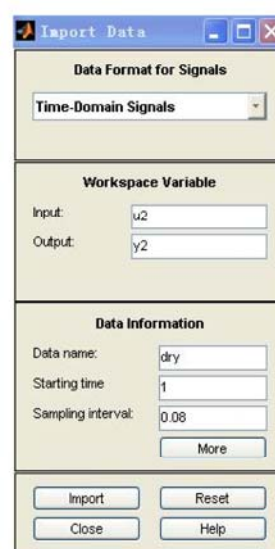


图 4.6 导入数据

系统延迟环节选择。根据四容系统机理模型 u_1 对 y_1 、 u_2 对 y_2 近似一阶惯性滞后环节，我们选择如下辨识模型结构：

$$\frac{K \exp(-T_d \cdot s)}{1 + T_p \cdot s} \quad (4.18)$$

u_1 对 y_2, u_2 对 y_1 近似二阶环节, 我们选择如下模型结构:

$$\frac{K \exp(-T_d \cdot s)}{(1 + T_{p1} \cdot s)(1 + T_{p2} \cdot s)} \quad (4.19)$$

按照相同方法, 我们对第二次采集得到的数据进行系统参数辨识。通过辨识得到系统的传递函数如下:

$$\begin{aligned} G_{11} &= \frac{7.1186}{107.11s + 1} \\ G_{21} &= \frac{8.6846}{(188.86s + 1)(51.519s + 1)} e^{-0.15s} \\ G_{12} &= \frac{7.4924}{(162.37s + 1)(72.269s + 1)} \\ G_{22} &= \frac{9.1065}{88.256s + 1} \end{aligned} \quad (4.20)$$

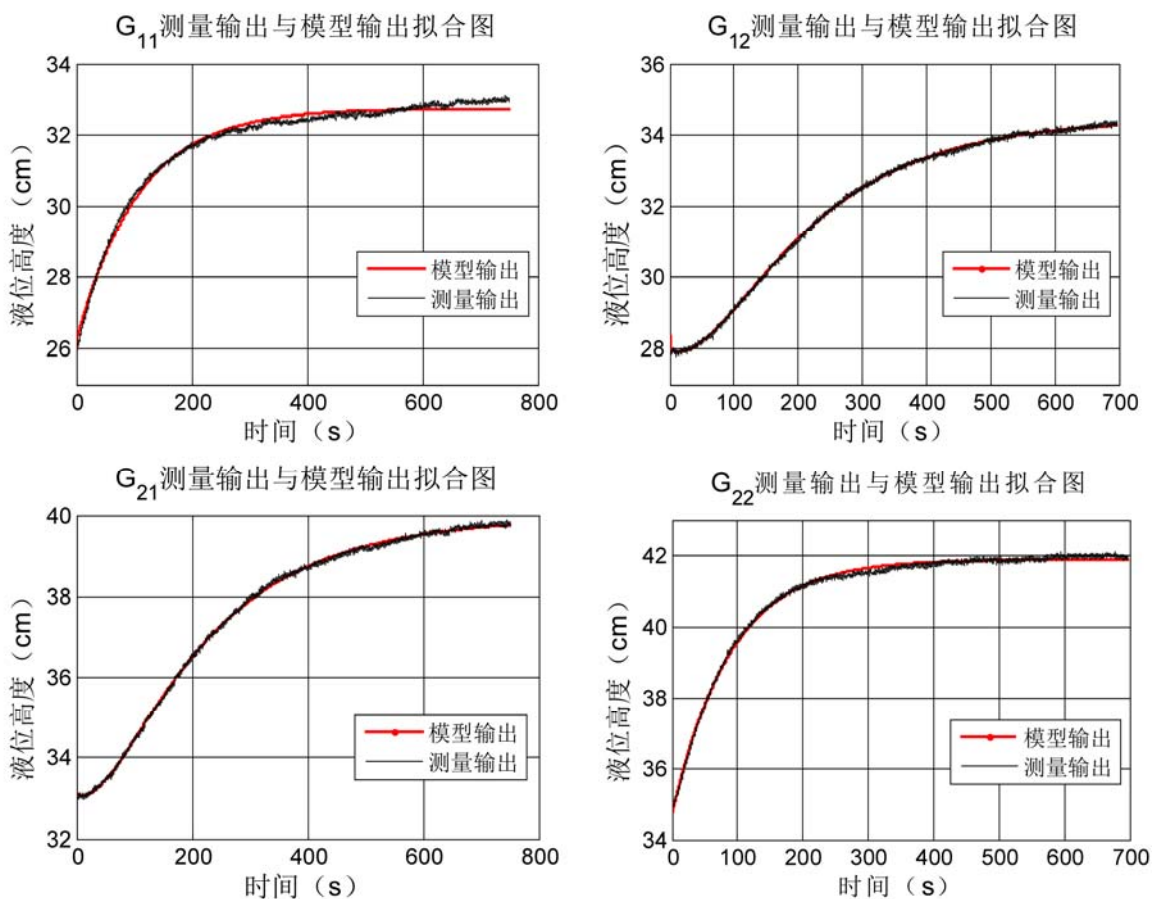


图 4.7 辨识模型与仿真曲线拟合结果

因为辨识得到传递函数 G_{11} 、 G_{12} 、 G_{22} 的时滞项 $T_d=0$, 传递函数 G_{21} 的时滞项 $T_d=0.15$,

由于时滞很小，对系统控制影响不大，我们将其忽略，我们将系统的传递函数写成如下形式。

$$\begin{aligned}G_{11} &= \frac{7.1186}{107.11s+1} \\G_{21} &= \frac{8.6846}{(188.86s+1)(51.519s+1)} \\G_{12} &= \frac{7.4924}{(162.37s+1)(72.269s+1)} \\G_{22} &= \frac{9.1065}{88.256s+1}\end{aligned}\tag{4.21}$$

传递函数测量输出与模拟模型输出拟合如图 4.7 所示。 G_{11} 拟合率为 91.15%， G_{21} 拟合率为 97.55%， G_{12} 拟合率为 97.65%， G_{22} 拟合率为 94.85%。

4.4 本章小结

本章首先对四容系统实验装置的工作原理进行简要的介绍，根据伯努利方程推导出四容系统的数学模型；然后借助 MATLAB 参数辨识工具箱完成了四容系统过程模型参数辨识。

第 5 章 四容系统控制算法实现

在第四章，我们通过机理法得到了系统的状态空间表达式，并通过阶跃响应辨识的方法获得了系统的传递函数。为了验证实验装置设计的可行性和系统性能，在本章中我们设计了基于辨识模型的内模控制器和基于机理模型的 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器，并在四容系统上进行了实验验证。

5.1 内模控制

5.1.1 内模原理

非线性系统的控制器很多都是基于系统的动态模型而设计的，系统的动态模型即内部模型。如果不知道系统的内部模型，可以采用函数逼近技术得到系统的近似模型^[37,38]。内模控制（Internal Model Control, IMC）是基于被控对象数学模型设计控制器的一种方法。内模控制的设计思想是将被控系统的内部模型与实际被控系统相并联，使控制器逼近模型的动态逆。对于单变量系统，内模控制器取为内部模型最小相位部分的逆，并通过附加低通滤波器以增强系统的鲁棒性^[39-41]。

内模控制的一般结构如图 5.1 所示：

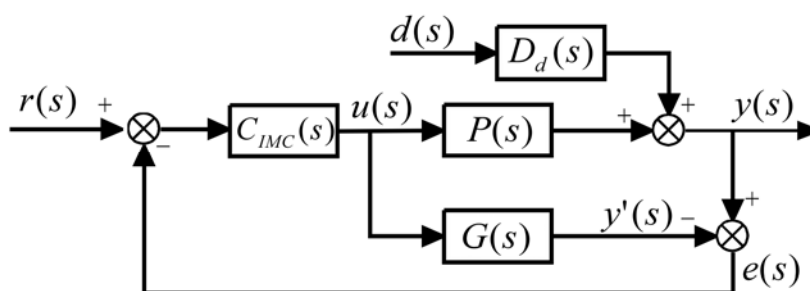


图 5.1 内模控制的一般结构

图中 $y(s)$ 、 $r(s)$ 、 $u(s)$ 分别为被控对象的输出、给定输入和操作量， $e(s)$ 为反馈误差值， $P(s)$ 和 $G(s)$ 分别为被控对象和被控对象的内部模型， $y'(s)$ 为被控对象内部模型输出， $d(s)$ 和 $D_d(s)$ 分别为外部扰动和扰动到输出的传递函数， $C_{IMC}(s)$ 为内模控制器。为便于获得输入和系统外部干扰与输出的关系和便于实际工程应用，将内模控制结构图进行等价转换如图 5.2 所示。

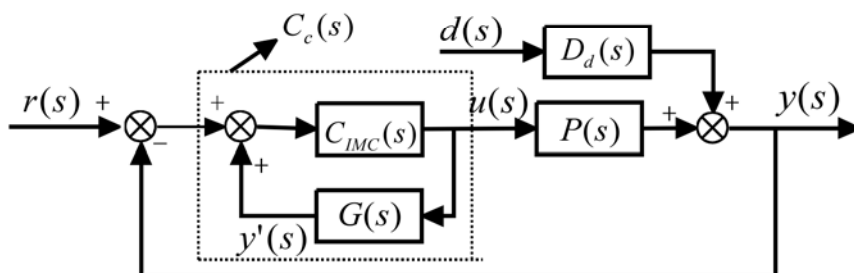


图 5.2 内模控制等效图

对于图 5.2 的内环反馈器 $C_c(s)$ ，其传递函数为：

$$C_c(s) = \frac{C_{IMC}(s)}{1 - C_{IMC}(s)G(s)} \quad (5.1)$$

由图 5.1 我们可以得到系统输出与输入的传递函数为

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{C_{IMC}(s)P(s)}{1 + C_{IMC}(s)[P(s) - G(s)]} \quad (5.2)$$

输出与干扰之间的传递函数为

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{[1 - C_{IMC}(s)G(s)]D_d(s)}{1 + C_{IMC}(s)[P(s) - G(s)]} \quad (5.3)$$

整个系统的闭环响应为

$$y(s) = \frac{C_{IMC}(s)P(s)}{1 + C_{IMC}(s)[P(s) - G(s)]} r(s) + \frac{[1 - C_{IMC}(s)G(s)]}{1 + C_{IMC}(s)[P(s) - G(s)]} D_d(s)d(s) \quad (5.4)$$

反馈误差为

$$e(s) = [P(s) - G(s)]u(s) + D_d(s)d(s) \quad (5.5)$$

由式 (5.4) 可以看出，当模型准确时，即 $P(s) = G(s)$ 时，如果选取 $C_{IMC}(s) = G^{-1}(s)$ ，即内模控制器等于对象模型的逆，此时系统闭环输出只和过程的前向通道传递函数有关。在外界扰动 $d(s) = 0$ 时，系统的反馈信号为 0，系统有完美的给定值跟踪和干扰抑制效果。当模型失配时，式 (5.5) 反馈误差值 $e(s)$ 既包括模型失配信息，同时还包括作用于系统的外部干扰信息。

但是，过程模型 $G(s)$ 中往往包含时滞、惯性及非最小相位环节，这就使得 $G^{-1}(s)$ 中存在物理上难以实现的超前时滞和纯微分项，以及不稳定的右半平面极点。所以，在设计内模控制器时，我们将稳定环节和不稳定环节分开进行设计，同时在控制器中附加低通滤波器以保证系统鲁棒性。

5.1.2 分散内模控制

分散内模控制又称为分布式内模控制或主回路内模控制^[42,43]。四容系统为双输入双输出耦合系统，我们在主回路上按单变量的方法进行内模控制器设计，将耦合回路看作是对主回路的干扰，这样可在不用解耦的情况下实现对四容系统的液位控制。四容系统分散控制结构如图 5.3 所示。图中 $P_{11}(s)$ 、 $P_{21}(s)$ 、 $P_{12}(s)$ 、 $P_{22}(s)$ 为被控制对象， $G_{11}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 为过程模型， $C_{IMC1}(s)$ 、 $C_{IMC2}(s)$ 为内模控制器， $r_1(s)$ 、 $r_2(s)$ 为输入， $y_1(s)$ 、 $y_2(s)$ 为输出。

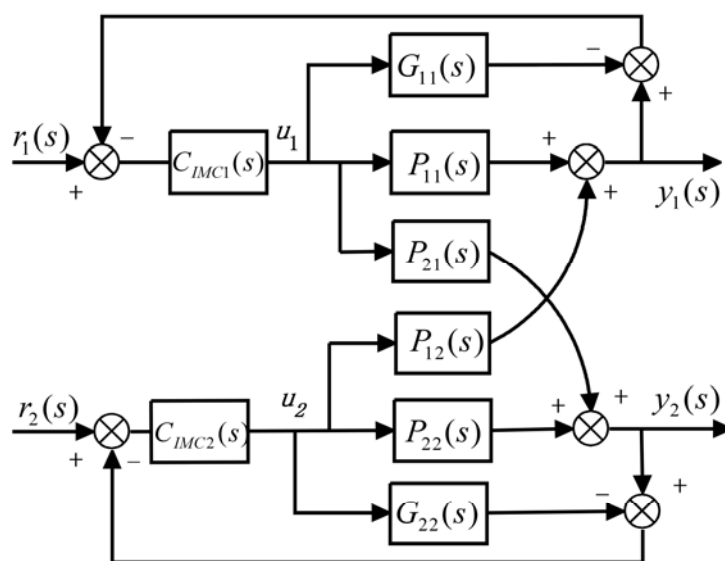


图 5.3 四容系统分散内模控制结构图

根据分散内模控制设计方案，我们以水泵 1 流量对水箱 1 液位高度影响，水泵 2 流量对水箱 2 液位高度的影响作为主回路，水泵 1 对水箱 2，水泵 2 对水箱 1 的影响看作是干扰进行控制器设计。由第四章式 (4.21) 可知四容系统的过程模型为

$$\begin{aligned}
 G_{11} &= \frac{7.1186}{107.11s+1} \\
 G_{21} &= \frac{8.6846}{(188.86s+1)(51.519s+1)} \\
 G_{12} &= \frac{7.4924}{(162.37s+1)(72.269s+1)} \\
 G_{22} &= \frac{9.1065}{88.256s+1}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

假定模型匹配，即 $P(s) = G(s)$ ，设计内模控制器 C_{IMC} 分为两步：

第一步：模型分解。过程模型 $G(s)$ 分解成两部分：

$$G(s) = G_+(s)G_-(s) \quad (5.7)$$

$G_+(s)$ 是过程模型 $G(s)$ 中的不可逆部分，包含了所有非最小相位零点和过程控制系统的时滞。 $G_-(s)$ 是过程模型 $G(s)$ 中可逆部分，包含了系统的最小相位传递函数部分。

由于四容系统过程模型中不含有时滞、惯性环节及右半平面零点，所以，

$$G_{11-}(s) = G_{11} = \frac{7.1186}{107.11s+1} \quad (5.8)$$

$$G_{22-}(s) = G_{22} = \frac{9.1065}{88.256s+1} \quad (5.9)$$

第二步：设计 C_{IMC} 。内模控制器结构如下：

$$C_{IMC}(s) = G_-^{-1}(s)f(s) \quad (5.10)$$

式中 $f(s) = \frac{1}{(\alpha s + 1)^n}$ ， α 为滤波器参数， n 为滤波器阶数。滤波器阶数 n 的选择应保证

$C_{IMC}(s)$ 正则（分母的阶次大于或等于分子的阶次）有理。在内模控制器的设计中，滤波器中的参数 α 是唯一可整定的参数。滤波器既克服了系统的随机干扰又很好的解决了模型失配问题。引入滤波器 $f(s)$ 使控制器可实现，且能保证内模控制系统的控制品质和鲁棒性。

根据式 (5.10) 我们设计内模控制器如下：

$$C_{IMC1}(s) = G_{11-}^{-1}(s)f(s) = \frac{107.11s+1}{7.1186(\alpha_1s+1)^{n_1}} \quad (5.11)$$

$$C_{IMC2}(s) = G_{22-}^{-1}(s)f(s) = \frac{88.256s+1}{9.1065(\alpha_2s+1)^{n_2}} \quad (5.12)$$

为保证内模控制器正则有理，这里我们取滤波器的阶数 $n_1 = n_2 = 1$ ，则式 (5.11)，(5.12) 可写成如下形式：

$$C_{IMC1}(s) = \frac{107.11s+1}{7.1186(\alpha_1s+1)} \quad (5.13)$$

$$C_{IMC2}(s) = \frac{88.256s+1}{9.1065(\alpha_2s+1)} \quad (5.14)$$

内模控制器中 α_1 和 α_2 是可调参数。 α 取值越小，系统响应速度越快，反之系统会有比较好的稳定性和鲁棒性。

5.1.3 仿真分析

我们在 MATLAB/Simlink 环境下搭建四容系统非线性模型，并对设计的控制器进行仿真分析。我们设定水箱 1 和水箱 2 的初始液位高度分别为 26cm 和 32.5cm，水箱 1 在 $t=920s$ 时，液位设定值跃变为 30cm，在 $t=1380s$ 时，液位设定值跃变为 26cm，水箱 2 在 $t=700s$ 时，液位设定值跃变为 37.5cm，在 $t=1200s$ 时，液位设定值跃变为 32.5cm，分散内模控制仿真如图 5.4 所示。

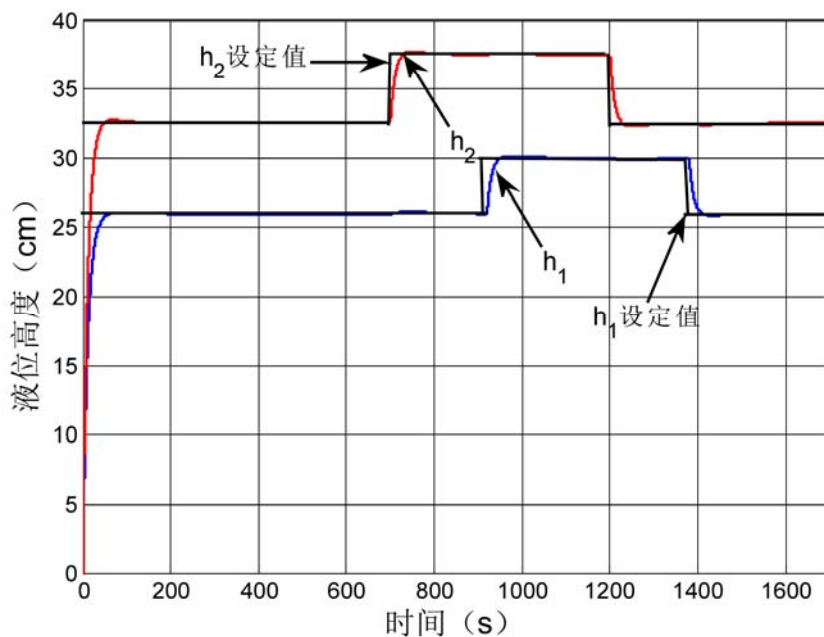


图 5.4 四容系统分散内模仿真图

分散内模控制能够实现四容系统设定液位值的快速跟踪，且没有超调。在设定液位值发生变化时，系统也能实现快速跟踪，且一个水箱液位设定值的变化对另外一个水箱的影响很小，系统具有很好的抗干扰能力。

5.1.4 内模控制实验

我们将分散内模控制器用于四容系统实验装置进行液位控制，设定水箱 1 的参考液位值为 26cm，水箱 2 的参考液位值为 32.5cm，水箱 1 在 $t=930s$ 时，液位设定值跃变为 30cm，在 $t=1380s$ 时，液位设定值跃变为 26cm，水箱 2 在 $t=700s$ 时，液位设定值跃变为 32.5cm，在 $t=1200s$ 时，液位设定值跃变为 32.5cm，实验结果如图 5.5 所示。

由图 5.5 可以看出，具有分散内模控制器的四容系统在 170 秒能够达到所设定的液位高度，当一个水箱的液位设定值发生变化时，对另外一个水箱影响较小。系统具有满

意的控制结果。

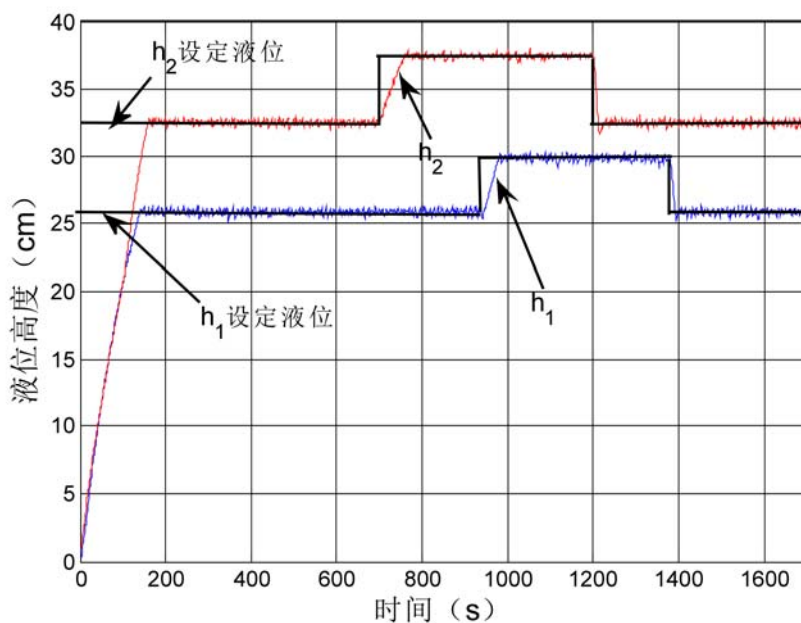


图 5.5 四容水箱分散内模控制器控制效果图

5.2 H_∞ 状态反馈控制

5.2.1 H_∞ 控制理论

H_∞ 控制是一种鲁棒控制设计方法，具有控制效果好，抗干扰能力强，设计思路简明等特点。 H_∞ 控制理论适用对象从线性定常系统到线性时变系统、非线性系统及广义系统、从集中参数到分散参数，其应用研究涉及航天航空^[44, 45]、工业生产^[46, 47, 48]、机器人^[49, 50]等许多领域，并不断取得新的进展^[51]。 H_∞ 状态反馈控制问题描述如图 5.6 所示。

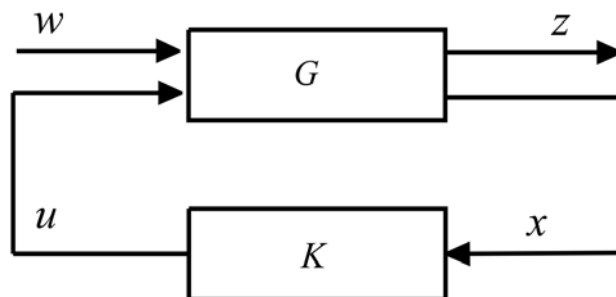


图 5.6 H_∞ 控制问题的基本框图

G 是被制对象， K 是状态反馈控制器增益， w 是包括所有外部输入的信号， z 是被调

输出， u 是控制输入， x 是测量输出。我们把控制对象 G 分解，可得到：

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

而输入与输出之间的关系为：

$$\begin{bmatrix} z \\ x \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

定义从输入 w 到输出 z 的 \mathcal{H}_∞ 范数如下^[51]

$$\|G\|_\infty := \sup_{w \in l_2} \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} \quad (5.17)$$

其中 $w \in l_2$ 表示 w 是能量有界信号，即

$$\|w\|_2^2 := \int_0^\infty w(t)^T w(t) dt < \infty \quad (5.18)$$

考虑线性定常系统，系统的 \mathcal{H}_∞ 范数表征为系统频率响应的最大奇异值的峰值，对非线性、时变系统，更通常的名称是输入输出信号的 l_2 增益。它反映了在能量有界信号的作用下，系统输出信号与输入信号的能量之比。

5.2.2 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器设计

本节依据线性矩阵不等式 (Linear Matrix Inequality, LMI) 设计 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器。考虑以下线性时不变连续系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z_1 = C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ z_2 = C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t) \end{cases} \quad (5.19)$$

满足以下时域硬约束

$$|z_{2i}| \leq z_{2i, \max}, \quad i = 1, 2, \dots, n_{z_2}, t \geq 0 \quad (5.20)$$

其中 $x \in R^{n_x}$ 为系统状态， $w \in R^{n_w}$ 为干扰输入， $u \in R^{n_u}$ 为控制输入， $z_1 \in R^{n_{z_1}}$ 为 \mathcal{H}_∞ 性能输出， $z_2 \in R^{n_{z_2}}$ 为约束输出。我们假设 $D_{21} = 0$ ，即干扰输入对系统的约束输出没有直接影响。

假设系统状态完全可测量，考虑状态反馈控制律 $u = Kx$ ，对应的闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{cl}x(t) + B_{cl}w(t) \\ z_1 = C_{cl,1}x(t) + D_{cl,1}w(t) \\ z_2 = C_{cl,2}x(t) \end{cases} \quad (5.21)$$

其中 $A_{cl} = A + B_2K$, $C_{cl,1} = C_1 + D_{12}K$, $C_{cl,2} = C_2 + D_{22}K$, $B_{cl} = B_1$, $D_{cl,1} = D_{11}$ 。

控制目标为设计一个控制器,使得闭环系统内部稳定,从干扰输入 $w(t)$ 到优化输出 $z_1(t)$ 的 \mathcal{H}_∞ 范数最小,同时满足时域硬约束 z_2 。

给定标量 $\gamma > 0$, 如果存在矩阵 $Q (Q^T = Q > 0)$ 和 Y 满足下列矩阵不等式^[52],

$$\begin{bmatrix} AQ + QA^T + B_2Y + Y^T B_2^T & * & * \\ B_1^T & -\gamma I & * \\ C_1Q + D_{12}Y & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (5.22)$$

这里*表示转置矩阵沿对角线的对称元素, I 为相应维数的单位矩阵。定义反馈增益 $K := YP$, 其中 $P := Q^{-1}$ 。可以证明如果 LMI (5.22) 可行, 则状态反馈 K 可以保证 $A + BK$ 是渐近稳定的。

定义一个二次存储函数 $V(x) = x^T P x$, 则不等式 (5.22) 与如下耗散不等式等价

$$\frac{d}{dt} V(x(t)) + \gamma^{-1} \|z_1(t)\|^2 - \gamma \|w(t)\|^2 \leq 0 \quad (5.23)$$

对上式在 $[0, t \geq 0]$ 区间上积分, 进而导出耗散积分不等式

$$V(x(t)) + \gamma^{-1} \int_0^t \|z_1(\tau)\|^2 d\tau \leq \gamma \int_0^t \|w(\tau)\|^2 d\tau + V(x(0)) \quad (5.24)$$

由于 $V(x) \geq 0$, 这样我们可以知道, 当 $x(0) = 0$ 时, 由干扰输入 w 到性能输出 z_1 的 \mathcal{H}_∞ 范数小于 γ 。

假设干扰能量有界, 即

$$\int_0^\infty \|w(t)\|^2 dt \leq w_{\max} \quad (5.25)$$

这意味着该干扰的状态轨迹包含在如下的椭圆域内

$$\Omega(P, \alpha) := \{x \in R^n \mid V(x) \leq \alpha\} \quad (5.26)$$

这里 $\alpha := \gamma w_{\max} + V(x(0))$ 。给定 P 和 α , 在干扰有界的情况下椭圆域 $\Omega(P, \alpha)$ 包含闭环系统所有的状态。根据Cauchy-Schwarz不等式^[53]推导可得到:

$$\begin{aligned}
 \max_{t \geq 0} |z_{2i}(t)|^2 &= \max_{t \geq 0} |(C_2 + D_{2u}YQ^{-1})_i x(t)|^2 \\
 &\leq \max_{x \in \Omega} |(C_2 + D_{2u}YQ^{-1})_i x|^2 \\
 &\leq \alpha \|(C_2Q + D_{2u}Y)Q^{-(1/2)}\|_i^2 \\
 &= \alpha((C_2 + D_{2u}Y)Q^{-1}(C_2 + D_{2u}Y)^T)_{ii}
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

根据Schur补定理, 如果式(5.22)中 Q 、 Y 满足以下不等式

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha}Z & C_2Q + D_{2u}Y \\ * & Q \end{bmatrix} \geq 0 \tag{5.28}$$

约束输出 $\|z_{2i}\| \leq z_{2i,\max}$ 得到满足, 其中 $Z_{ii} \leq z_{i,\max}^2$, Z 的非对角线元素均为零。

综上, 基于线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 方法, 我们可以得到求解约束 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器的半定规划问题:

$$\underset{\gamma, Q=Q^T > 0, Y}{\text{minimize}} \quad \gamma \quad \text{s.t.} \quad \text{LMIs (5.22), (5.28)} \tag{5.29}$$

根据文献^[54]可知, 系统状态反馈控制率 $K^* = Y^*(Q^*)^{-1}$ 。其中 Y^* , Q^* 是问题 (5.28) 的解, K^* 是最优控制。

5.2.3 四容水箱 \mathcal{H}_∞ 控制

我们在 4.2 节已推导出四容系统状态空间表达式, 首先对式 (4.3) 在平衡点处进行线性化、归一化处理。线性化、归一化后的状态空间表达式如下

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1g}{A_1\sqrt{2gh_1^0}} & 0 & -\frac{a_3gh_3^0}{h_1^0A_1\sqrt{2gh_3^0}} & 0 \\ 0 & -\frac{a_2g}{A_2\sqrt{2gh_2^0}} & 0 & -\frac{a_4gh_4^0}{h_2^0A_2\sqrt{2gh_4^0}} \\ 0 & 0 & -\frac{a_3g}{A_3\sqrt{2gh_3^0}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{a_4g}{A_4\sqrt{2gh_4^0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} -\frac{g}{A_1\sqrt{2gh_1^0}} & 0 \\ 0 & -\frac{g}{A_2\sqrt{2gh_2^0}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{r_1}{h_1^0 A_1} & 0 \\ 0 & \frac{r_2}{h_2^0 A_2} \\ 0 & \frac{1-r_2}{h_3^0 A_3} \\ \frac{1-r_1}{h_4^0 A_4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

由于四容系统是对下面两个水箱进行液位控制，希望液位能够达到设定值，我们将水箱 1 和水箱 2 的液位高度作为 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制的性能输出。

$$z_1 = \begin{bmatrix} z_{11}(t) \\ z_{12}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

考虑执行机构输出饱和限制，水泵流量不能超过最大流量，即

$$Q_{1i}(t) \leq Q_{1,\max} \quad t \geq 0$$

$$Q_{2i}(t) \leq Q_{2,\max} \quad t \geq 0$$

因此将水泵流量 Q_1 、 Q_2 选为约束输出

$$z_2 = \begin{bmatrix} z_{21}(t) \\ z_{22}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

四容系统平衡点处数据如表 5.1 所示

表 5.1 四容系统平衡点

Q_1^0	149.152cm ³ /s	Q_2^0	147.89cm ³ /s
h_1^0	28.5 cm	h_3^0	13.76cm
h_2^0	33.5 cm	h_4^0	18.8cm
r_1	0.528	r_2	0.549

h_1^0 、 h_2^0 、 h_3^0 、 h_4^0 、 Q_1^0 、 Q_2^0 表示分别给两个水泵 4V 的电压，系统达到平衡时的四个水箱的液位高度和水泵 1，水泵 2 的流速， r_1 、 r_2 表示阀门 1 和阀门 2 的开度。

通过 MATLAB 中的 LMI 工具箱，根据式 (5.29)，可以解得 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器增益矩阵 K 如下

$$K = \begin{bmatrix} -1.7116 & -0.1535 & -0.1187 & -0.1018 \\ -0.1290 & -1.7276 & -0.1292 & -0.1186 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

5.2.4 仿真与分析

为了验证 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器控制性能，我们在 Matlab 环境搭建四容系统的非线性模型，对所设计的控制器进行仿真验证。

我们在下面两个水箱分别加入外部干扰，用来模拟水箱漏水，控制器仿真如图 5.7 所示。图中 h_1 、 h_2 分别为水箱 1 和水箱 2 的液位变化曲线， hr_1 、 hr_2 分别为水箱 1 和水箱 2 的液位设定值，系统运行 380 秒时我们在水箱 1 加入一个幅值为 0.2，持续时间为 20 秒的干扰信号，在 640 秒时在水箱 2 加入一个幅值为 0.2，持续时间为 20 秒的干扰信号，我们可以看到，加入干扰信号后，系统能够在 100 秒内再次达到平衡。控制量输出如图 5.8 所示，图中 u_1 、 u_2 分别为水泵 1 和水泵 2 的输入电压。仿真结果表明， \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器能够快速实现四容系统的液位高度定值跟踪，具有良好的抗干扰性能。

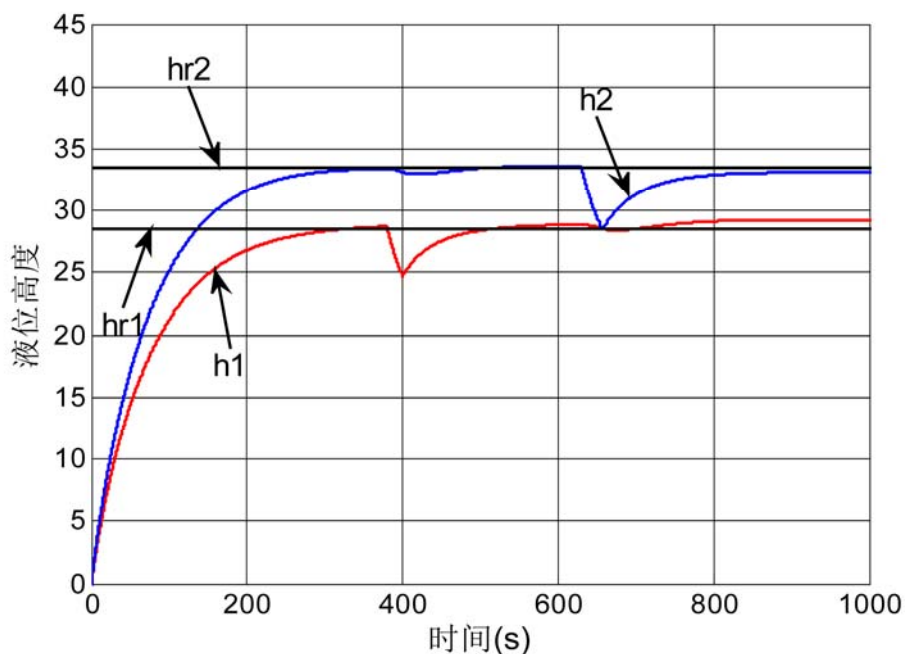


图 5.7 四容系统 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制仿真图

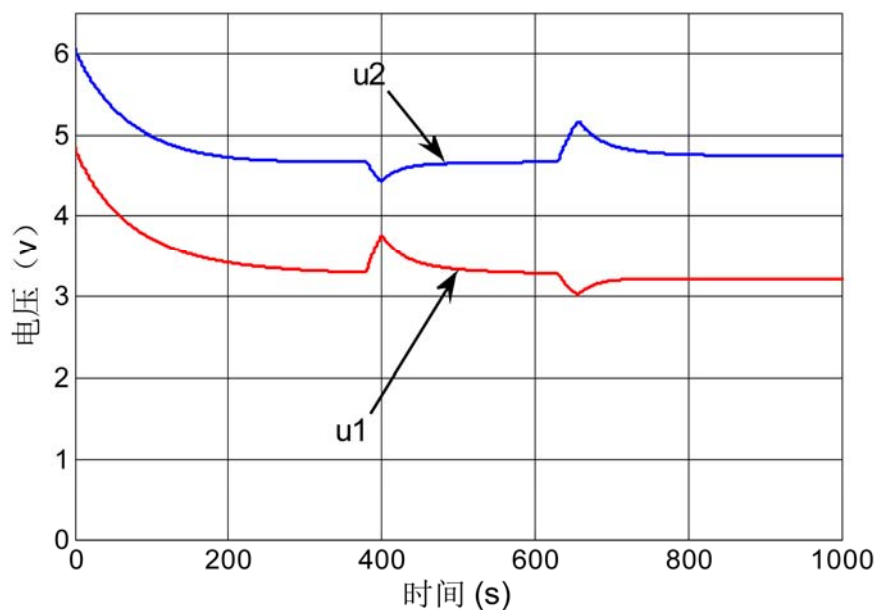
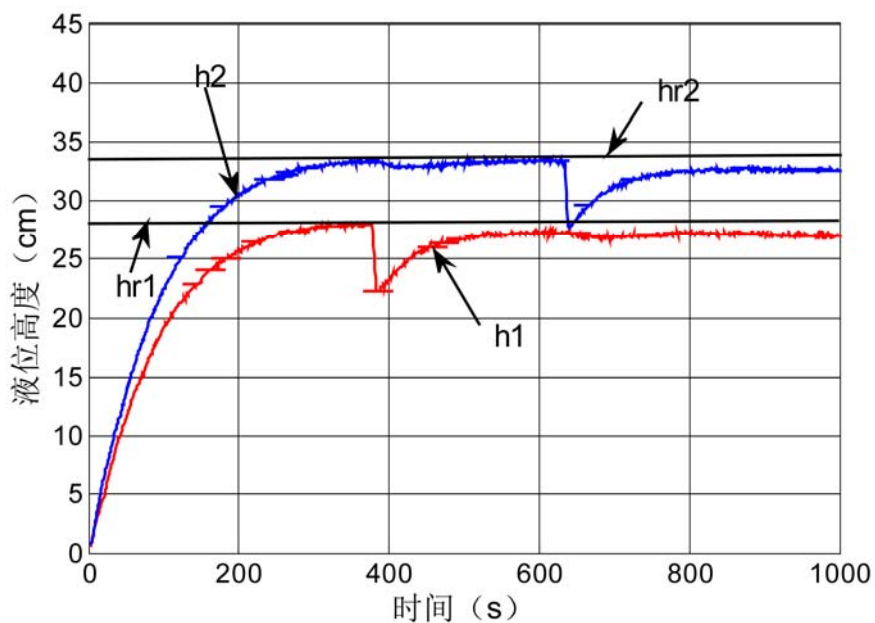


图 5.8 系统控制量输出图

5.2.5 H_∞ 控制实验

我们将 H_∞ 状态反馈控制器在四容水箱系统上进行控制实验，实验结果如图 5.9 所示。

图 5.9 四容系统 H_∞ 控制实验图

图中 h_1 、 h_2 分别为水箱 1 和水箱 2 的液位变化曲线， hr_1 、 hr_2 分别为水箱 1 和水箱 2 的

液位设定值，在系统运行 380 秒时，设置水箱 1 漏水故障点，漏水时长 5 秒，漏水量 1000 毫升，在系统运行 640 秒时，设置水箱 2 漏水故障点，漏水时长 6 秒，漏水量 1200 毫升。控制器输出如图 5.10 所示，图中 u_1 、 u_2 分别为水泵 1 和水泵 2 的输入电压。

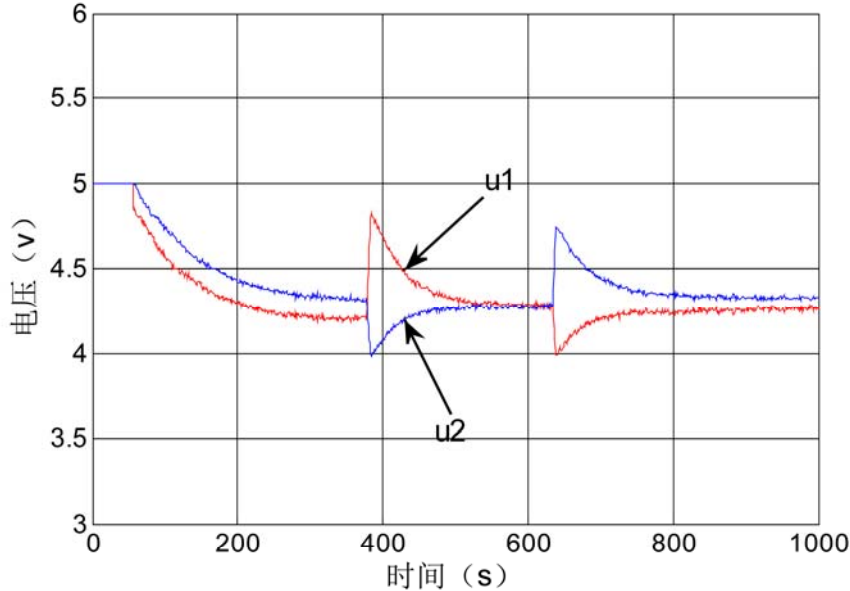


图 5.10 H_∞ 状态反馈控制器输出

实验结果表明基于机理模型的 H_∞ 状态反馈控制器在四容系统上有良好的跟踪特性，系统抗干扰性强。

5.3 本章小结

本章主要是为了验证实验装置的可行性、可靠性和软硬件的性能，设计了基于辨识模型的分散内模控制器和基于机理模型的 H_∞ 状态反馈控制器，并在四容系统上进行控制实验。仿真和实验结果表明，内模控制器能够有效的跟踪期望的液位，具有理想的控制性能。基于 H_∞ 的状态反馈控制器的四容水箱系统具有良好的定值跟踪特性，系统抗干扰性强。实验证实四容水箱实验装置设计合理，能够实现对多种控制算法的验证。

第6章 总结与展望

本课题的主要工作是根据工业生产中液位控制的特点自主设计开发了一套四容水箱液位控制系统实验装置。四容系统是多输入多输出、时滞、耦合、相位可调的非线性系统，具有很强的工业背景和实际应用价值。利用四容系统实验装置我们可以实现 PID 控制、内模控制、模型预测控制、神经网络控制、 \mathcal{H}_∞ 控制、模糊控制等多种控制算法，在科学研究和理论创新上起到了重要作用。本课题设计开发的四容水箱液位控制系统实验装置为实验室提供了一套操作简单、性能稳定、算法开放的实验平台。本文主要工作如下：

1. 完成了实验装置的总体设计。实验装置分为硬件和软件系统两部分，硬件上主要包括检测机构、执行机构、工控机、数据采集卡等设备，软件系统功能的实现是基于 MATLAB 软件，通过 MATLAB 驱动数据采集卡实现系统的控制功能。

2. 完成硬件平台的选型搭建。根据实验装置总体设计方案，为满足实验装置性能要求，对实验装置所用的硬件设备进行了选型。硬件设备主要包括水箱、水槽、工控机、压力传感器、PCI-1710U 数据采集卡、水泵及调速机构和稳压电源。根据四容系统工作原理我们将所选硬件设备进行组装和电气连接，最后进行调试，并对传感器和水泵进行了标定。

3. 完成了系统软件功能的设计。系统软件功能的实现是基于 MATLAB 软件，利用 MATLAB 编程方式驱动数据采集卡实现系统的控制功能。根据实验特点，软件系统采用模块化设计，主要包括控制功能模块、数据采集模块、图形显示模块、参数设置模块等。利用 MATLAB/GUI 设计了用户操作界面，对软件系统进行集成，提高软件系统与用户的交互性。

4. 辨识了四容系统的参数。首先对四容系统的工作原理进行了介绍，根据伯努利方程推导了四容系统非线性方程表达式，在平衡点线性化建立系统的机理模型，借助 MATLAB 系统辨识工具箱完成了四容系统传递函数的参数辨识。

5. 为验证四容水箱液位控制系统实验装置设计的可行性，本课题分别设计了基于辨识模型的内模控制器和基于机理模型的 \mathcal{H}_∞ 状态反馈控制器。在四容系统分散内模控制实验时，给定液位参考值一个阶跃变化，系统能够实现给定值跟踪，具有良好的控制性能。在进行 \mathcal{H}_∞ 控制时，设定下水箱漏水故障点，检验系统抗干扰性能，通过实验验证了实验装置设计合理，性能可靠。

对未来工作的展望

1. 对系统采集的模拟信号处理还需要进一步改进。目前在信号采集时受外界电磁干扰较大，而硬件滤波上仅设计了 RC 电路滤波，使采集的信号波动幅度较大，离系统精确控制还有一定的差距。下一步，在信号输入端对模拟信号采取光电隔离，设计数字滤波器等方式，进一步提高信号采集的精确度。

2. 本实验装置仅对液位高度和水泵流量进行控制，对温度、压力等参数的影响没有涉及，下步还可以对实验装置进行改进，加入对温度、压力等参数的控制，使实验装置更贴近实际生产过程。

3. 本实验装置软件系统采用了 MATLAB 编程方式实现，由于时间比较仓促，在用户界面的设计上还不够完善、美观，目前仅能实现对系统控制的基本功能，对于一些复杂的算法还需要手动导入。以后将对用户操作界面进一步完善，使控制界面性能更完善，交互性更好。

4. 为了验证实验装置设计的可行性，我们仅设计了基于辨识模型的内模控制器和基于机理模型的 H_{∞} 状态反馈控制器，在实验装置上进行了控制实验。以后我们将采用多种先进的算法设计控制器应用在四容系统中，进一步对实验装置进行验证。

参考文献

- [1] 赵一博. 四容水箱过程控制装置设计与实现[D]. 北京北方工业大学, 2011.
- [2] 石雪萍, 伍星, 滕彩虹. 单容水箱液位高度的计算机直接控制系统设计[J]. 仪表技术, 2007, 07: 42-44.
- [3] 魏衡华, 吴汉生, 双容水箱计算机控制实验系统的研制[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(1): 31-33.
- [4] 王华忠, 孙自强, 王慧锋等. 基于智能仪表和 PLC 的双容水箱测控实验系统开发[J]. 电气电子教学学报, 2009, 31(S2): 1-3.
- [5] 王晓静, 潘迪夫, 韩锬. 基于 LabVIEW 平台的三容水箱实验系统的设计和实现[J]. 企业技术开发, 2008, 27(1): 3-5.
- [6] Johansson K H. The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(3): 456-464.
- [7] CS4000 高级过程控制实验装置设备使用说明书.
http://edu.supcon.com/Products_Show.asp?id=203#a.
- [8] Malar R S M, Thyagarajan T. Design of Decentralized Fuzzy Pre compensated PI Controllers for Quadruple -Tank System[J]. International Journal of Recent Trends in Engineering, 2009(5): 188-192.
- [9] Tobias Raff, Christian Ebenbauer, and Frank Allgower. Nonlinear Model Predictive Control: A Passivity-based Approach[C]. Int. Workshop on Assessment and Future Directions of NMPC, Freudenstadt. Lauterbad, Germany, August 26-30, 2005.
- [10] Numsomran A, Suksri T, Tipsuwanporn V, Trisuwannawat T, Tirasesth K. Design of PID Controller for the Modified Quadruple-Tank Process using Inverted Decoupling Technique[J]. International Conference on Control, Automation and Systems, 2011, 11(10): 1364-1368.

- [11] Astrom K J, Johansson K H, Wang Q G. Design of decoupled PI controllers for two-by-two systems[J]. Department of Automation Control, 2002, 149(1): 74-81.
- [12] Numsomran A, Suksri T, Tipsuwanporn V, Trisuwannawat T, Tirasesth K. Design of PI Controller Using Decoupling and CRA Techniques for Quadruple-Tanks Process[J]. International Conference on Control. Automation and Systems, 2011, 11(10): 1358-1363.
- [13] 吴夏来, 戴文战. 一种改进的广义预测算法及其在三容液位控制中的应用[J]. 浙江理工大学学报, 2010, 27(5): 729-732.
- [14] 陈永新, 柯尊忠, 伍德林. 精校机电液位置伺服系统的广义预测控制[J]. 机床与液压, 2011, 39(9): 71-73.
- [15] Deepa T, Lakshmi P, Vidya S. Level Control of Quadruple tank process using Discrete time Model Predictive Control [J]. Electronics Computer Technology, 2011, 1(8): 162-166.
- [16] Almurib H A F, Askari M, Moghavvemi M. Model Predictive Control of Quadruple Tanks System [J]. SICE Annual Conference, 2011: 87-91.
- [17] 李训杰, 刘剑, 王维庆. 双容神经网络解耦控制的在线实现[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(10): 212-214.
- [18] 薛美盛, 吴刚, 孙德敏, 王永. 工业过程的先进控制[J]. 化工自动化及仪表, 2002, 29(2): 1-9.
- [19] 乔茂伟, 韦永斌. BP 基于 PSO 的神经网络 PID 在液位控制中的应用[J]. 自动化与仪表, 2012, 27(9): 43-47.
- [20] 敖茂尧. 串级液位控制系统的改进粒子群神经网络 PID 控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(1): 95-99.
- [21] Rajendran S, Muthu H, Siddhardhan R, et al. Design of ANFIS Controller for Quadruple-Tank Interacting System[J]. International Journal of Engineering Research and Applications. 2014, 4(4): 152-157.
- [22] Alireza B V, Fatehi A, Khaki. Sedigh A. Neural Network Model-Based Predictive

- Control for Multivariable Nonlinear Systems[J]. International Conference on Control Applications, 2010: 920-925.
- [23] Noura Hassan, Theilliol Didier and Sauter Dominique. Actuator Fault-Tolerant Control Design: demonstration on a three-tank system[J]. International Journal of Systems Science. 2000: 1143-1155.
- [24] V. Dardinier-Maron, F. Hamelin and N. Hassan. A Fault-Tolerant Control Design against Major Actuator Failures-Application to a Three-Tank System[C]. Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control. 1999: 3569-3574.
- [25] T. Marcu, L. Mirea and P. M. Frank. Neural Observer Schemes for Robust Detection and Isolation of Process Faults[C]. UKACC International Conference on Control. 1998: 958-963.
- [26] T. Marcu, L. Mirea. Robust Detection and Isolation of Process Faults Using Neural Networks[J]. Control Systems Magazine, IEEE. 1997, 17(5): 72-79.
- [27] Pezeshkian M, Ozma H, Khosrowjerdi M J. A Robust Approach to Fault Tolerant Controller Design Based on GIMC structure for Non-Minimum Phase systems [J]. International Conference on Control, Instrumentation and Automation. 2011: 564-569.
- [28] Pourmohammad S, Yazdizadeh A. Adaptive Fuzzy Multivariable Controller Design Based on the Lyapunov Scheme[J]. Cybernetics and Intelligent Systems, 2008: 893-898.
- [29] 张志涌, 精通 MATLAB R2011a[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2011.
- [30] 陈焱光, 毛涛涛. 精通 MATLAB GUI 设计 (第三版) [M]. 北京: 电子工业出版社. 2013.
- [31] 刘卫国. MATLAB 程序设计与应用 (第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社. 2011.
- [32] 卜玉明. 智能仪表测量信号的标度变换及实现[J]. 自动化仪表, 2000, 21(2): 47-48.
- [33] Johansson K H, Horch A, Wijk O, et al. Teaching multivariable control using the quadruple-tank process[J]. Conference on Decision & Control, 1999: 807-812.
- [34] 杨承志. 系统辨识与自适应控制[M]. 重庆: 重庆大学出版社. 2003.

- [35] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社. 1988.
- [36] 王再英, 刘淮霞, 陈毅静. 过程控制系统与仪表[M]. 北京: 机械工业出版社. 2006.
- [37] Carlos E, Garcia, Manfred Morari. Internal model control. A unifying review and some new results[C]. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1982, 21(2): 472-484.
- [38] Kishida M, Braatz R D. Internal Model Control[M]. Springer US, 2010.
- [39] 文新宇, 张井岗, 赵志诚. 内模控制研究综述[J]. 电气自动化, 2003, 25(1): 3-7.
- [40] 周涌, 陈庆伟, 胡维礼. 内模控制研究的新发展[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 475-482.
- [41] 刘红军, 韩璞, 孙海蓉等. 基于内模控制的 PID 控制器的设计[J]. 计算机仿真, 2005, 22(3): 207-210.
- [42] Chen D, Seborg D. E. Design of decentralized PI control system based on Nyquist stability analysis[J]. Journal of Process Control. 2003, 13(1): 27-39.
- [43] Tan G T, Chiu M S. A multiple. model approach to decentralized internal model control design[J]. Chemical Engineering Science. 2001, 56(11): 6651-6660.
- [44] 廖光煌, 李秋红, 卢辰昊, 黄金泉. 涡轴发动机 LQ/H_∞ 抗扰控制方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 2140-2146.
- [45] 邓泓, 孙兆伟, 仲惟超. 控制输入受限的拦截卫星轨道鲁棒 H₂/H_∞ 控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(9): 1108-1114.
- [46] 张长青, 杨锋, 薛建中, 黄永宣. 锅炉汽温控制 H_∞ 性能状态观测器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 109-113.
- [47] 田艳兵, 卢燕. H_∞ 控制理论在直流矿井提升机调速系统中的应用[J]. 煤矿机械, 2010(3): 194-196.
- [48] 郑平旭, 江浩, 龙新华, 孟光. 基于 H_∞ 的铣削加工振动主动控制[J]. 振动与冲击, 2014(5): 31-36.
- [49] 李东武, 张跃, 储海荣, 贾宏光. 基于 H_∞ 回路成形的无人机纵向鲁棒控制器研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(12): 3239-3242.
- [50] 叶柄能, 陈力. 时延估计柔性空间机器人鲁棒 H_∞ 控制及振动抑制[J]. 空间科学

- 学报, 2016: 237-244.
- [51] 刘珊中, 孙隆和. H_∞ 控制理论及应用的研究综述[J]. 电光与控制. 2007, 14(3):87-91.
- [52] Chen H, Guo K H. Constrained H_∞ control of active suspensions: An LMI approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(3): 412-421.
- [53] K Zhou, J. C. Doyle, K. Glover. Robust and Optimal control. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [54] Boyd S P. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory[J]. Proc. IEEE Int. conf. robotics Automation, 1994, 85(5): 798 – 799.

附 录

1 PCI-1710U 数据采集卡主要参数

数据采集卡主要性能特点

(1) PCI-1710U 使用 PCI 控制器连接卡和 PCI 总线，即插即用。控制器符合 PCI 总线规格 Rev2.1 标准。所有与总线相关的配置，如基地址、中断分配等均由软件自动控制。进行配置时，用户无需设置任何跳线和 DIP 开关。

(2) PCI-1710U 配有自动通道/增益扫描电路。该电路能代替软件控制采样期间多路采样值的切换。板载 SRAM 存储了每个通道的不同增益值及配置。这种设计允许用户对不同通道使用不同增益，并自由组合单端和差分输入来完成多通道的高速采样（采样速率最高达 100kHz）。

(3) 模拟量输入

- 1) 通道：16 路单端或 8 路差分模拟量输入（可通过驱动程序进行配置）
- 2) 分辨率：12 位
- 3) 板载 FIFO:4K 采样
- 4) 最大输入过压：±30 V
- 5) 输入阻抗：1 GΩ
- 6) 触发模式：软件、板载可编程定时器或者外部触发器
- 7) 输入范围：电压、软件可编程。

模拟量输入具体技术参数见表 1。

表 1 PCI-1710U 模拟量输入技术参数

PCI-1710U					
增益	0.5	1	2	4	8
双极性	±10	±5	±2.5	±1.25	±0.625
单极性	N/A	0~10	0~5	0~2.5	0~1.25
精度 (% of FSR)	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4

(4) 模拟量输出

- 1) 通道：2 路

- 2) 分辨率: 12 位
 - 3) 输出速率: 静态更新
 - 4) 输出范围: 可通过软件编程(内部参考电压: 0~5V, 0~10V; 外部参考电压: -10V~0, 0~10V)
 - 5) 电压变化率: 10 V/ μ s
 - 6) 精度: ± 1 LSB
 - 7) 增益误差: ± 1 LSB
 - 8) 驱动能力: 3mA
- (5) PCI-1710U 配有板载 FIFO 缓存, 它能存储多达 4K 的 A/D 采样值。当 FIFO 半满时, PCI-1710U 会产生一个中断。该特性能保证连续高速的数据传输以及在 Windows 下更可靠的性能。

2 实验装置软件系统移植

MATLAB 软件功能非常强大, 开发效率高, 与其他软件兼容性好。MATLAB 提供了外部程序接口, 允许 MATLAB 和其他应用程序进行数据交换, 并且提供了 C/C++、FORTRAN 数学和图形函数库, 为在其他程序设计语言中调用 MATLAB 高效算法提供了可能。四容水箱液位控制系统的软件系统是用 MATLAB 软件编写的, 对于没有安装 MATLAB 软件的计算机, 则无法使用本系统。为提高系统运行效率和实现系统在脱离 MATLAB 的工作环境使用, 用户可以使用 MATLAB 编译器 (Matlab Compiler, MCC) 实现软件系统的移植。MATLAB 编译器可以将 MATLAB/GUI 直接编译成可独立运行的 EXE 文件, 通过未安装 MATLAB 的计算机上安装 MCRInstaller.exe, 调用 MATLAB 中所使用的函数库, 实现脱离 MATLAB 环境运行。

这里我们介绍将用 MATLAB 语言编写的函数文件编译成可独立执行的 EXE 文件, 实现软件系统脱离 MATLAB 环境运行的方法。

首先要安装和配置 Matlab Compiler。一般在安装 MATLAB 软件时就已经安装了相应版本的 Matlab Compiler。不同版本的 MATLAB, 其编译器的使用方法有一定的差异。在安装好 Matlab Compiler 后, 还需要对 Compiler 进行适当的配置, 方法是在 MATLAB 命令窗口输入: Mbuild.setup。然后根据提示执行相应的操作, 用户可根据自己计算机中现有编译器的情况选择合适的编译器, 如 VC++ 6.0、VC++7.0、VC++8.0、Bland C 的编译器等。如果用户计算机里没有安装其他任何语言的编译器, 也可选择 MATLAB

自带的 Lcc 编译器。这里我们使用 MATLAB 自带的 Lcc 编译器。

配置好编译器后就可以对软件系统进行编译，这里只对 GUI 操作界面的 M 文件进行编译。将 FIG 文件、M 文件、以及 GUI 要调用的 M 文件放在同一个文件夹内。使用 mcc 命令编译 GUI 程序。

编译完成后得到的每一个 EXE 文件都可以双击打开。如果要在没有安装 MATLAB 的计算机上执行编译后的程序，则需要安装 MCRInstaller.exe，安装步骤如下。

首先要将 MATLAB 根目录下的 \toolbox\compiler\deploy\win32 文件夹中的 MCRinstaller.exe 安装到该计算机上。

其次是要将 MCRinstaller.exe 安装目录\runtime\win32 这个路径添加到该计算机的环境变量中，添加的方法是：右击我的电脑/属性/高级/环境变量/添加/指定一个变量名，然后将上述路径复制到里面。

第三步是将编译生成的相关文件拷贝到同一目录下。这样就可以在没有安装 MATLAB 的计算机上运行 MATLAB 编译后产生的可执行文件。

作者简介及研究成果

作者简介：

作者：侯成玉，男，汉族，1982年12月生于山东省菏泽市。2008年7月毕业于中国人民解放军军事交通学院装备保障指挥专业，并获得学士学位。2013年9月考入吉林大学攻读硕士，现就读于吉林大学通信工程学院控制理论与控制工程专业，主要研究方向为过程控制。

攻读硕士学位期间发表的论文：

1. Yu S, Hou C, Qu T, et al. A revisit to MPC of discrete-time nonlinear systems[C]// IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. IEEE, 2015.

攻读硕士学位期间参加的科研项目：

1. 973 课题“跨尺度微重力补偿实现的基座控制”。(No. 2012CB821202);
2. 国家自然科学基金重点项目“面向安全性的电动化汽车能效滚动优化”。(No.61520106008);
3. 国家自然科学基金面上项目“模型预测控制的内在鲁棒性研究”。(No.61573165)。

致 谢

时光荏苒，三年研究生学习已接近尾声，回想这三年，受益良多，感慨良多。作为一个军队强军计划的考生，本科学习的专业是装备保障指挥，而现在要学习控制理论与控制工程专业。两个不相干的专业并没有阻挡我求知的欲望，不知多少个披星戴月，早出晚归的日子，虽辛苦但收获更让人欣慰。

在这里我要特别感谢我的指导老师于树友老师，从入学起就为我的学业制定了详细的计划，从参加本科生课程的学习，弥补基础理论的不足，到成立学习小组，每周抽出半天的时间陪我们共同学习，帮忙解决学习上的疑问，再到毕业设计，三次查看帮助纠正发现的问题，我的每一点进步都凝结了于老师的大量心血。于老师对工作近乎完美的追求，甘于奉献的精神，一身正气的作风是我终生学习的榜样，在此我祝愿于老师及家人，身体健康，工作顺利。

在这里我还要感谢隋振老师，孙晓东老师，王宇雷老师在实验装置硬件调试时为我提供的巨大的帮忙。感谢实验室的小伙伴，王菁、刘洋、王严、范广栋、谭雷、王伍洋、郭洋，对我学习和生活上的帮忙。感谢本科毕设同学，宋钰、张强、田东、程石、黄润西，在我做毕业设计期间提供了无私的帮助。尤其感谢王严和宋钰同学在实验装置软件系统设计和控制算法中做的大量工作。

特别感谢我的父母、岳父母、爱人王书杰、弟弟侯成光、侯祥，感谢你们默默的付出和大力的支持，没有你们的支持，就没有我今天的成就。

感谢所有关心和帮忙过我的人！