

12/5577

# 浙江大学

## 硕士学位论文



论文题目 电液伺服阀分布式测试系统研发

作者姓名 范文玲

指导教师 王庆丰教授

学科(专业) 机械电子工程

所在学院 机械与能源工程学院

提交日期 二〇〇七年五月

## 摘要

传统的手工测试系统，结构复杂、成本高、故障率高，测试精度低，远不能满足现代液压元器件的测试需求。为提高测试的精度及速度，降低试验成本，本文设计开发了一套具有远程测试功能的电液伺服阀分布式测试系统。本系统主要由液压试验平台和分布式测控系统二大部分组成。伺服阀的性能测试是通过 PLC、触摸屏和 PC 机配合实现。PLC 管理整个测试系统的底层电气控制和低速数据采集，触摸屏实现试验人员与 PLC 系统的人机交互，而 PC 计算机采集高速数据并与 PLC 进行低速数据交换，再进行数据计算处理。这种控制模式，既发挥了 PLC 控制精度高、抗干扰能力强、可靠性好的特点，又充分利用了 PC 机良好的数据分析和处理的能力。本测试系统的特点之一是实现了伺服阀性能测试过程的远程监测，允许多个远程终端在与试验现场相距甚远的位置上对测试过程进行与本地测试系统同步的远程监测。

本文在对大量文献作了深入研究后，提出了测试系统的整体结构，并对测试系统的两大主要问题，频率特性测试方法及分布式数据通信策略进行详细研究，在此基础上设计并实现了测控软件及硬件系统，最后对电液伺服阀的两个典型性能进行了测试，验证了测试系统的功能完整性和可靠性。论文主要章节安排如下：

第一章论述了液压测试技术和远程监控技术的发展及现状，并对本课题的研究背景、研究意义，以及研究内容做了阐述。

第二章介绍了电液伺服阀的性能指标及液压试验平台结构，在此基础上，设计了分布式测试系统的整体方案，并对测控系统划分了功能层次，同时提出了 PLC 及 PC 机系统的软硬件构成。

第三章介绍了频率特性测试的互相关原理，并以互相关原理为基础设计了电液伺服阀频率特性的测试方案，研究了频率特性测试过程中的关键技术——软件信号合成、高速数据采集、动态液压缸位置纠偏、计算机信号处理。

第四章研究分布式数据通信解决方案，包括本地串口通信和远程 TCP/IP 网络通信，针对不同的通信特点，制定行之有效的通信协议和通信格式；针对远程用户争用试验台控制权问题，给出了相应的解决方案；同时研究了独立数据请求机制，保证远程用户在任意时刻加入网络系统均可获得整个试验过程的试验数据。

第五章对分布式测控系统的本地及远程测控软件进行统一设计，实现了软件复用，并完成了软件的模块化开发。设计了伺服阀放大板的通用输出接口电路，并在电气系统中设计了有效的抗干扰措施。本章从软硬件两方面完成了测控系统设计及实现。

第六章在所研发的电液伺服阀测试系统上，对电液伺服阀的两个典型性能进行了测试，验证了测试系统的功能完整性和可靠性。

第七章做了总结和回顾，并对将来的工作确定了研究方向。

关键词：电液伺服阀 液压试验平台 分布式测控系统 频率特性 通信

## Abstract

Traditional manual testing system which has complex structure, high cost, high failure rate and low accuracy, is far from the testing demand of modern hydraulic elements and devices. In order to resolve the problem, this paper designs and exploits a distributing test system to be used to test electrohydraulic servo valve. This system consists of hydraulic test bench, and PC control system. Automatization test is executed by collaboration of PC, PLC and touch panel. PLC manages the bottom system and connects the low speed data. PC connects the high and low speed data, and processes data. This kind of model not only exploits the advantage that PLC has high control accuracy, strong anti-interference capacity and good reliability, but also makes full use of the good data analyzing and processing of IPC. Remote monitor function that allows a few remote users monitor the test process from a distance at the same time is the typical point of the paper.

In chapter 1, an overall summary of hydraulic testing technology and remote monitoring technology are given. Explicate the research background, significance and contents of the project.

In chapter 2, introduce the capability target of electrohydraulic servo valve and the structure of its hydraulic test bench. Design the test system scheme. Explicate every layer's function of test system. Bring forward the software and hardware composing of PLC and PC.

In chapter 3, introduce the frequency response characteristic test system based on correlation principle. Study the key technology, including signal compound by software, high speed data collection, position deviation rectify, signal processing.

In chapter 4, explain the solution of distributing communication, frame the communication protocol and format, and present the mechanism to decide who will control the test bench when many users want to at the same time.

In chapter 5, define the function of the software test system. Design the function frame, and show the interface of the software. Design the all-purpose interface circuit and anti-jamming measure.

In chapter 6, validate the test bench's integrality and reliability by two typical experimentations.

In chapter 7, summarize and review this paper, then give the possible research orientation in future.

**Key Words:** Electrohydraulic Servo Valve    Hydraulic Experimental Bench  
PC Test&Control System    Frequency Response Characteristic    Communication

学号 20508132

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 范文玲 签字日期： 2007 年 6 月 11 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名： 范文玲

导师签名： 王明华

签字日期： 2007 年 6 月 11 日

签字日期： 07 年 6 月 11 日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

# 1 绪论

**【摘要】**本章简要论述了液压测试技术及远程监控技术的发展及现状，并阐述了本课题研究的背景、意义，以及课题研究的主要内容。

**【关键词】**液压测试技术 远程监控技术 发展

## 1.1 液压测试技术的发展及现状

液压传动以其功率密度高，易于实现直线运动、速度刚度大、便于冷却散热、动作实现容易等突出优点，在实际工业过程中有非常广泛的应用。自液压系统最早出现开始，都存在测试和测量的基本需要。

液压测试系统从起步至今，经历了两个阶段：手工测试、记录阶段；计算机辅助测试(CAT)阶段<sup>[1]</sup>。

早期的液压系统的测试是非常简陋和粗糙的，测试大都采用手工的方式进行。手工测试一般由安装有按钮、开关、指示灯等指令、显示元件的电器操作台和安装有保险装置、继电器、控制器等控制元件的电控柜等组成的泵源、油路控制部分，信号发生器、记录仪、示波器等作为测试显示记录部分，测试参数主要是通过压力表、流量计、电子秒表、量杯、转矩仪、转速表、光电测速仪的读数获得，而对液压系统或液压元件在其负载变化过程中表现出的流量、功率、转速转矩、效率、速度等相应性能参数的连续测试存在相当大的难度，数据处理、图形显现也相当费时。这种测试系统控制部分结构复杂、成本高、故障率高且故障排除难度大，测试部分因涉及多种复杂仪器、仪表，对测试系统操作人员素质要求高，测试过程由试验人员手动操作，测试数据采用模拟式记录仪连续记录或由试验人员手工逐点读取，试验结果是由试验人员根据试验数据或试验曲线手工处理出特性指标。用这种人工方法进行试验及数据处理，会给试验带来较多人为因素影响，故测试精度低、测试速度慢，且劳动强度大。

计算机技术的发展给传统的测试技术注入了强大的活力。计算机辅助测试(Computer Aided Test)技术是测试技术发展的重要产物，目前大多数测试装置都是以功能强大的计算机为基础的。计算机技术和仪器技术结合后可以将信号分析与处理、结果表达与输出放到计算机上完成。计算机软件可以实现各种各样的信号分析、处理，完成多种多样的测试功能；计算机显示器可以形象、方便地模拟各种仪器控制面板，以各种形式表达输出检测结果。此外通过各种计算机接口、总线(ISA, PCI等)、或是专用的仪器接口HP-IB, GPIB, VXI)，计算机可以和其他测试设备一起组成一个功能更加强大的测试系统。总之，充分利用计算机丰富的软硬件资源，可以较大突破传统仪器在数据处理、表达、传递、存储等方面的限制，达到传统仪器无法比拟的效果。

液压计算机辅助测试(Computer Aided Test)，简称液压 CAT，是一门新兴的综合学

科,所涉及范围包括液压、自动控制、微型计算机、测试技术、数字信号处理、可靠性等。液压 CAT 利用计算机建立一套数据采集和数字控制系统,与试验台连接起来,由计算机对各试验参数,如压力、温度、流量、转速、扭矩等高精度的检测仪器和数字转换技术对参数进行数据采集、量化,且充分利用计算机多次采集并计算所有观测数据的平均值对试验数据进行处理,并伴随试验的进行随时输出测试结果。在试验过程中,计算机还可根据数字反馈或人工输入要求,对测试过程进行控制,达到计算机密切跟踪和控制试验台及试件状态的目的。与常规液压测试系统相比,液压 CAT 系统主要有以下优点:

1) 提高测试精度。计算机具有很强的运算处理能力,可以对测试数据进行各种复杂的处理,使实验结果的评定更具有科学性。通过高速采集处理,可以减少不同时性误差;通过非线性校正可以减少非线性误差;通过多次采样平均、数字滤波、回归处理,可以抑制随机误差;实验数据的自动采集可以避免人为误差。据调查 CAT 技术可以使测试精度提高一个等级。

2) 提高测试速度。计算机采集、存储数据的速度快、运算速度高。因此可以在较短的时间内完成实验数据的采集、传输、存储和处理,大大缩短了测试时间,这对降低实验费用有重要意义。

3) 增强数据处理能力。这是 CAT 的最突出的特点,对需要进行复杂数据处理的实验台具有特别的价值,能大大减少工作人员的工作量。

4) 方便用户使用。CAT 具有简单易学、清晰明了的人机交互界面,具有完善的数据管理、测试结果输出等功能,用户可以通过简单的界面操作来实现所要求的功能。

在国外由于微机和电子技术发展较早、较快,水平较高,极大的推动了液压 CAT 技术的应用和发展。早在 1964 年,美国 Sundstrand 公司的液压传动试验室就利用计算机进行试验数据处理,整个数据处理系统由以下三部分组成: a) 数据采集; b) 数据变换; c) 数据处理。其数据采集部分对输入模拟信号进行采样,并将采集到的数据穿成纸带,数据变换部分完成由纸带到卡片的转换,最后,以计算机为核心的数据处理部分通过卡片读入机输入试验数据,经处理后输出试验结果。由于当时集成微处理器及相应的集成接口芯片尚未问世,无法组成廉价的 CAT 系统,因而采用了上述系统结构以提高计算机的利用率。1979 年, Gale A. Holloway 等人曾对美国国际收割机公司农业装备工程中心液压元件寿命试验室 CAT 系统作过报道,该系统使用的计算机是美国 DEC 公司的 PDP II/70 多用户小型机 CAT 系统与其他用户一起分享计算机资源。这一 CAT 系统的控制功能和运算处理功能虽然很强,但设备费用很高。

自从 1974 年第一片集成微处理器诞生以后,微型计算机由于体积小、价格低而得到了迅速发展,很快便渗透并占领了各个技术领域,在液压测试系统中也得到了应用。与微型计算机配套的各种通用外围扩展插板(如 A/D+D/A 卡、并行 I/O 卡、串行 I/O 卡等)的发展,使人们能很方便地用它们构成计算机辅助测试系统。M.Jacobs 和 J.Trost 于

1983 年撰文介绍了他们将微型计算机用于比例阀和伺服阀静、动态特性测试的情况,该测试系统由微型计算机、接口电路、打印机、数字绘图仪组成,通过微机控制完成数据采集、处理、结果打印、特性曲线绘制等任务。利用微机对液压泵、马达进行自动化特性测试和研究也有文献报道。

在国内液压测试技术经过 30 多年的发展已有很大进展,首先表现在 CAT 技术的引入。从 70 年代后期开始,一些企业和高校就将单板机或 PC 机应用于液压测试中。液压 CAT 的应用模式,经历了下面四个阶段<sup>[2]</sup>:

- 1) 常规二次仪表+单板机+汇编语言;
- 2) 常规二次仪表+专用接口+计算机+高级(或汇编语言)+输出设备;
- 3) 通用接口+微型机系统;
- 4) 兼有测试试验数据处理和计算机控制功能的微机系统。

从测试系统的功能看,已开发的液压测试系统有两种模式:一是计算机对测试装置进行控制并完成测试过程数据采集、处理一体化的系统,如北京机械工业自动化研究所的液压阀、液压泵、液压缸、液压马达试验台计算机辅助测试系统,上海交大和昆山液压件厂为武钢研制的新国际 B 级精度液压阀试验台的计算机辅助测试系统<sup>[3]</sup>,华中理工大学液压泵和马达特性智能测试系统、液压缸试验台 CAT 系统及电液伺服阀 CAT 系统,上海大学基于 VB 的液压马达测试台计算机测控系统<sup>[4]</sup>等。二是计算机不对测试装置进行控制,只进行数据采集、信号处理和试验结果输出的系统,如北京理工大学的液压泵、液压马达、液压泵-液压马达传动系统工作特性的计算机辅助试验系统,广州机床研究所液压泵性能和噪声计算机实时监测系统<sup>[5]</sup>等。浙江大学也作过相关研究,如基于虚拟仪器的液压 CAT 系统及液压元件通用测试系统<sup>[6]</sup>等。

## 1.2 远程监控技术的研究现状

计算机远程监控系统是信息技术发展的产物,它是以计算机为核心、结合多媒体技术、网络技术及工业自动化技术的一种监控网络系统。借助于远程监控可以将企业内部的信息网(Intranet)与控制网有效地连接起来,实现对生产、运营情况的随时掌握,把生产运营状况同企业的经营管理策略紧密结合,从而实现企业的综合自动化,可以建立网络范围内的监控数据和网上知识资源库。通过远程监控系统可以获得作业现场信息并发送到监控中心,经由计算机网络使其能够到达桌面计算机上,与信息管理系统融合在一起,而且可以充分发挥远程控制的功能,使操作者不必亲临现场就可以控制现场设备的运行。另外远程监控系统是伴随多媒体技术的发展产生的一种自动化、智能化的应用,它使得人们可以在异地看到现场设备的运作状况,同时对控制设备工作进行操纵,并对历史资料进行保存、管理和检索。

随着互联网技术的飞速发展,基于 Internet 的远程监控技术将成为新一代的监控

模式。国内外学者对远程监控技术已进行了深入的研究,主要集中在远程实验的研究以及远程监控应用于工业领域的研究。远程试验不仅能节省大量的试验资源,并能使实验者在不同的地点相互协助,也是进行远程控制研究的重要装置。现代试验设备由于其高度的精密和复杂性以及大量的信息获取和处理要求,基本上涵盖网络化生产与商业的技术问题,使得它成为一个非常好的前期模型。正因为如此,远程科学试验的研究倍受工业界的关注<sup>[7]</sup>。基于网络技术的远程试验,将成为 21 世纪科学实验室进行开放性研究的重要模式。

目前,国外一些大学对这方面已有了深入的研究。例如:Oak Ridge 国家实验室的研究人员开发的应用程序能远程安全控制像电子显微镜之类的昂贵的仪器<sup>[8]</sup>;新加坡国立大学(NUS)的虚拟实验室允许用户通过 Internet 进行远程试验,可以实现昂贵试验设备的共享<sup>[9][10]</sup>。美国德克萨斯州立大学建立了一个远程实验室。该试验系统的控制对象是一个倒立摆,主要提供给校内学生进行远程试验。

在国内,对远程试验的研究也取得了一定的成果。北京航空航天大学机器人研究所将互联网技术、机器人远程控制技术和计算机技术有机结合起来,建立了一个基于互联网的机器人远程试验系统。操作者可以在任何时间和任何地点通过互联网来控制 and 操作机器人臂手集成系统<sup>[11]</sup>。用户通过互联网可以进行机器人语言的学习、编程及直接控制机器人关节运动,完成一些简单的操作,也可以利用带有力觉和触觉反馈的人机交互设备,在虚拟仿真规划的基础上,完成复杂的操作任务。上海交通大学的纳米科技研究中心的蔡英文等在分析因特网信息传输机制的基础上,采用协议和客户机服务器模式实现了多用户远程分权控制扫描隧道显微镜仪 TCP/IP /STM 仪器<sup>[12]</sup>。应用该软件系统可以对远程设备进行实时控制,同时用户与操作者之间可以进行任意两者之间的语音与视觉交流,从而实现了科学实验的设备无关性,突破了现有科学研究对操作时间与地点的限制,为大幅度提高现有设备的使用效率和创建新的科研模式奠定了基础。此外,清华大学、西安交通大学、华中科技大学、北京邮电大学、北方工业大学和中科院上海原子核研究所等科研单位都进行了很多前期性基础研究工作。

### 1.3 课题的研究背景和意义

液压技术已广泛地应用于国民生产的各个环节,液压元件、组件和系统性能的高低直接影响机器的质量,对元件、组件和系统的性能参数进行测试分析,以满足各种用途的需要,就成为不可缺少的重要环节。由于液压元件影响因素繁多,参数选取不准等原因,液压元件特性的理论计算结果与实际状态之间往往存在较大的差异,因此在研究中往往注重对元件特性进行实际测试,实测的结果较之理论计算结果更能真实地反映元件的实际特性,对它们分析研究引出的结论对于液压系统的设计、调整、改造以及开展检测和诊断都具有重要意义。



在电液伺服系统中，电液伺服阀将系统的电气部分与液压部分连接起来，实现电液信号的转换与放大，以及对液压执行元件的控制。电液伺服阀是电液伺服系统的关键元件，它的性能关系到整个系统的控制精度和响应速度，也直接影响到整个系统工作的可靠性和寿命。电液伺服阀是液压系统中最复杂和关键的部件之一，从某种意义上看电液伺服阀的测试技术和测试水平代表了液压系统的测试技术的水平和发展方向。

本课题的目的及意义就在于对电液伺服阀的性能测试系统进行研究，建立一个具有远程监控功能的电液伺服阀分布式测试系统，以液压试验平台和分布式测控系统为基础，建立完善的通信机制和设计可靠的测试算法，实现对电液伺服阀特性的准确测试和远程监测。

## 1.4 课题主要研究内容

本文以电液伺服阀测试系统为研究对象，研究目标是实现一种高效、高精度的分布式电液伺服阀测试平台，能实现电液伺服阀静、动态性能的测试和远程监测。本课题的主要研究内容如下：

1) 电液伺服阀性能测试方案的设计：通过对目前几种主要的电液伺服阀测试系统方案进行研究、分析和比较，综合考虑工程设计目标、测试精度等条件，进行电液伺服阀测试系统软件和硬件结构设计。

2) 电液伺服阀频率特性测试方法研究：基于电液伺服阀测试系统的硬件结构提出了基于互相关原理的频率特性测试方法，并对测试过程中的关键技术，正弦扫频信号与纠偏控制信号的软件合成、高速实时数据采集、动态液压缸位置纠偏控制以及计算机信号处理进行研究

3) 数据通信机制的研究：分布式测控系统的远程监测功能是本课题研究的重点之一。测试过程中的测试数据量大，在测试过程中，必须建立准确高效的通信机制保证测试网络内所有的监测和控制终端之间相互协调。

4) 测控系统的软硬件实现：对分布式测控系统的本地及远程测控软件进行统一设计，实现了软件复用，并完成了软件的模块化开发。设计了伺服阀放大板的通用输出接口电路，并在电气系统中设计了有效的抗干扰措施。

5) 典型试验研究：在所研发的电液伺服阀测试系统上，对电液伺服阀的两个典型性能进行了测试，验证了测试系统的功能完整性和可靠性。

## 2 电液伺服阀测试系统的总体设计

**【摘要】**简要介绍了电液伺服阀的性能指标及液压试验平台结构,在此基础上,设计了分布式测试系统的整体方案,并对测控系统划分了功能层次,同时提出了 PLC 及 PC 机系统的软硬件构成。

**【关键词】**性能指标 液压平台 测控方案

### 2.1 电液伺服阀测试性能指标

测试的作用主要是考核被测试的元件或系统的各种输入输出特性是否满足预定的要求或规定的指标。电液伺服阀是非常复杂而又精密的液压元件,其性能参数和指标要求非常繁多,要求也十分严格。为了全面、科学地评价伺服阀的性能,各个国家都规定了一些能表征这些性能的参数及获得这些参数的试验方法与试验数据处理方法,并把它们制定成标准,作为人们进行试验研究及产品检验的依据。根据中华人民共和国国家标准规定电液伺服阀主要的稳态性能有:负载流量特性、空载流量特性、压力特性和内泄漏特性;主要的动态性能有:频率响应特性和瞬态特性。此外因为伺服阀经常在零区区域工作,所以零区特性特别重要。电液伺服阀的零区特性有零偏和零漂特性、零点阈值和分辨率。伺服阀的特性主要通过有关的性能曲线和指标来表示,如表 2.1 所示。

根据国家标准,伺服阀的各主要特性曲线的定义如下:

**负载流量曲线**——伺服阀的负载流量曲线表示在稳定状态下,输入电流,负载流量和负载压降三者之间的函数关系。负载流量曲线完全描述了伺服阀的静态特性。是用来确定伺服阀的类型和估计伺服阀的规格,以便与所要求的负载流量和负载压力相匹配。

**空载流量曲线**——空载流量曲线是在负载压降为零的条件下,使输入电流在正,负额定电流值之间以阀的动态特性不受影响的循环速度作一完整的循环所描绘出来的连续曲线。由流量曲线可以确定伺服阀的控制性能指标:控制流量、流量增益、滞环、线性度、不对称度。这些都是伺服阀重要的控制性能指标。

1) 流量增益:在所规定的工作区内,流量曲线的平均斜率,常用名义流量曲线求取。

2) 滞环:在额定正负电流之间,以小于动特性起作用的速度循环(通常不大于 0.05HZ),产生相同流量处往与返的控制电流之差的最大值对额定电流之比,以百分数表示。

3) 线性度:名义流量曲线与名义流量增益线相一致的程度。取名义流量曲线对名义流量增益线的最大偏差与额定电流之比,用百分数表示。

4) 对称度:两个极性流量增益之间相等的程度。取两极性名义流量增益之差对其中较大者之比,以百分数表示。

名义流量曲线是指流量曲线中心点的轨迹。

表 2.1 伺服阀的主要特性曲线和指标

伺服阀的性能	伺服阀试验	特性曲线	性能指标	
稳态特性	负载流量特性	负载流量曲线	额定流量、流量增益、非线性度、不对称度、滞环、分辨率	
	空载流量特性	空载流量曲线		
	压力特性	压力特性曲线		压力增益
	内泄漏	内泄漏曲线		零位泄漏
动态特性	频率响应	频率响应曲线	频宽	
	瞬态响应	瞬态响应曲线	响应时间	
零区特性	零偏		零偏位移	
	零漂	供油压力零漂曲线		
		回油压力零漂曲线		
		油温零漂曲线		
零点的阈值和分辨率		零点的阈值和分辨率		

**压力特性曲线**——压力特性曲线是输出流量为零(将两个负载口堵死)时, 负载压降与输入电流呈回环状的函数曲线。负载压力对输入电流的变化率就是压力增益, 以Pa/A表示。阀的压力增益通常规定为最大负载压降的 $\pm 40\%$ 之间, 负载压降对输入电流曲线的平均斜率。压力增益指标为输入1%的额定电流时, 负载压降应超过30%的额定工作压力。

**内泄漏流量**——是输出流量为零时, 由回油口流出的内部泄漏流量。内泄漏流量随输入电流而变化, 阀处于零位时(零位泄漏流量)为最大。阀的最大内泄漏流量应加以限制, 以免功率损失过大。通常要求最大内泄漏流量小于额定流量的10%。对两级伺服阀而言, 内泄漏流量由先导级的泄漏流量和输出级的泄漏流量组成。一般来说, 先导级的泄漏流量可以减小, 但是以牺牲相应速度为代价。输出级滑阀的泄漏流量随重叠情况变化颇大。较大的重叠可以减小泄漏, 但会使阀产生死区, 并使阀更容易淤塞, 从而使阀的滞环和分辨率增大。零位泄漏流量对新阀可作为滑阀制造质量指标, 对使用过的阀可反映其磨损情况。

**频率响应曲线**——电液伺服阀的频率响应是输入电流在某一频率范围内作等幅变频正弦变化时, 空载流量与输入电流的复数比。频率响应用幅值比和相位滞后与频率的关系表示。

**幅频特性：**伺服阀输出流量与激励信号间的幅值比随信号频率变化的关系是伺服阀的幅频特性；幅值比是某一特定频率下的输出流量幅值与输入电流幅值之比，除以一指定低频(输入电流基准频率，通常为5或10Hz)下的输出流量与同样输入电流幅值之比。通过幅频特性曲线可以得到对应于-3db的幅频宽。

**相频特性：**伺服阀输出流量与激励信号间的相位随信号频率变化的关系是伺服阀的相频特性。伺服阀的相位滞后是在某一指定频率之下所测得的伺服阀输入电流和与其相对应的输出流量变化之间的相位差。通过相频特性曲线可以得到对应于相位滞后90度的相频宽。应当指出，伺服阀的频率响应随油温，负载压力，输入电流幅值和其它一些工作条件而变化。做动态试验时，推荐输入电流的峰峰值为额定电流的一半( $\pm 25\%$ 额定电流)，基准频率通常为5或10Hz。如果输入电流幅度过大，所测得的伺服阀频率响应，在高频时由于力矩马达和中间级输出的限制，将出现饱和。输入电流幅值过小时，由于伺服阀分辨率的影响，将使波形产生畸变。无论哪一种情况，由于输出波形偏离正弦波形，都会使所得到的响应数据失去意义。

**瞬态响应——电液伺服阀的瞬态响应**是在伺服阀在阶跃电信号的输入情况下，阀的阀芯位移或输出流量的变化情况。通过瞬态响应试验，得到伺服阀的瞬态响应曲线，用来分析伺服阀的时域动态性能。

瞬态响应特性主要性能指标有：

1) 最大相对瞬时超调量  $\sigma_d$ ：为控制输出量最大瞬时峰值  $Y(t_p)$  与稳态终值  $Y(\infty)$  之比，以百分率计。

$$\sigma_d = \frac{Y(t_p) - Y(\infty)}{Y(\infty)} \times 100\% \quad (2.1)$$

2) 延滞时间  $t_d$ ：输入阶跃发生时刻至控制输出量响应变化到全幅值5%时的时间间隔。

3) 上升时间  $t_r$ ：控制输出量响应从全幅值的5%上升到95%所需的时间。

4) 峰值时间  $t_p$ ：输入阶跃发生时刻至控制输出量达到最大峰值的时间。

5) 调整时间  $t_s$ ：输入阶跃发生时刻至控制输出量达到新的稳定状态并保持其相对误差超过阶跃幅值的 $\pm 5\%$ 范围的时间。

6) 动态误差指标：设控制输出量的阶跃响应为  $y(t)$ ，稳态输出为  $y(\infty)$ ，则动态误差定义为：

$$e(t) = y(t) - y(\infty) \quad (2.2)$$

动态误差对时间的积分是被测试系统的动态参数的函数，在控制过程中常以这一积

分为基础,对系统进行动态响应特性的优化。

**零位特性**——伺服阀的零位是指空载控制流量为零的几何零位(位置)。零位区域是输出级的重叠对流量起主要影响的区域。因为伺服阀经常在零位区域工作,所以零位特性特别重要。零位特性主要的指标有:

1) **零偏**:使阀处于零位所需输入电流(电压)对额定电流(电压)之比,用百分数表示。零偏值可以通过专门的试验获得,也可以通过对压力增益或空载控制流量试验的实验数据进行分析处理得到。

2) **零漂**:工作压力、回油压力、温度等工作条件变化引起的零偏电流的变化,以额定电流百分数表示。零漂试验要得到工作压力零漂、回油压力零漂、温度零漂三条零漂曲线。

## 2.2 液压试验平台

液压试验平台是电液伺服阀分布式测试系统的试验基础。根据电液伺服阀测试性能试验相关要求,该液压试验平台由液压油源、伺服阀静态测试台、伺服阀动态测试台等部分组成。

### 1) 液压油源

测试系统的液压油源主要由供油系统、冷却系统和抽油系统三部分组成,系统的压力源与控制压力源分开。

供油系统为整个测控系统提供动力油源,由油箱、四个主泵、一个控制泵、过滤器以及蝶阀等组成,如图 2.1 所示。四个主泵由两个电液比例变量泵和两个定量泵组成,四个泵通过组合供油最大可供流量达 370L/min,流量变化从几 L/min 到 370L/min,系统压力可达 35.0MPa。控制油源为整个测控系统提供控制用的动力油源,并同时为电液比例变量泵提供控制动力油源。

冷却系统由 200L/min 循环泵、循环双筒过滤器、板式冷却器以及一些截止阀组成,通过水温和流速来调节油温。同时循环泵还可以向泵、马达试验台中的泵和液压缸试验回路中的加载油缸提供油源。

抽油系统将漏入试验台的泄漏油抽回主油箱。抽油系统由 125L 抽油油箱、液位指示器、空气滤清器、吸油滤油器、齿轮泵、压力过滤器和单向阀等组成,它把各试验台外部油液通过底油盘收集到抽油油箱,再通过齿轮泵回收到主油箱,通过液位指示器上两个位置继电器状态来判断抽油油箱中油液位置,从而决定是否开启电机使齿轮泵工作。

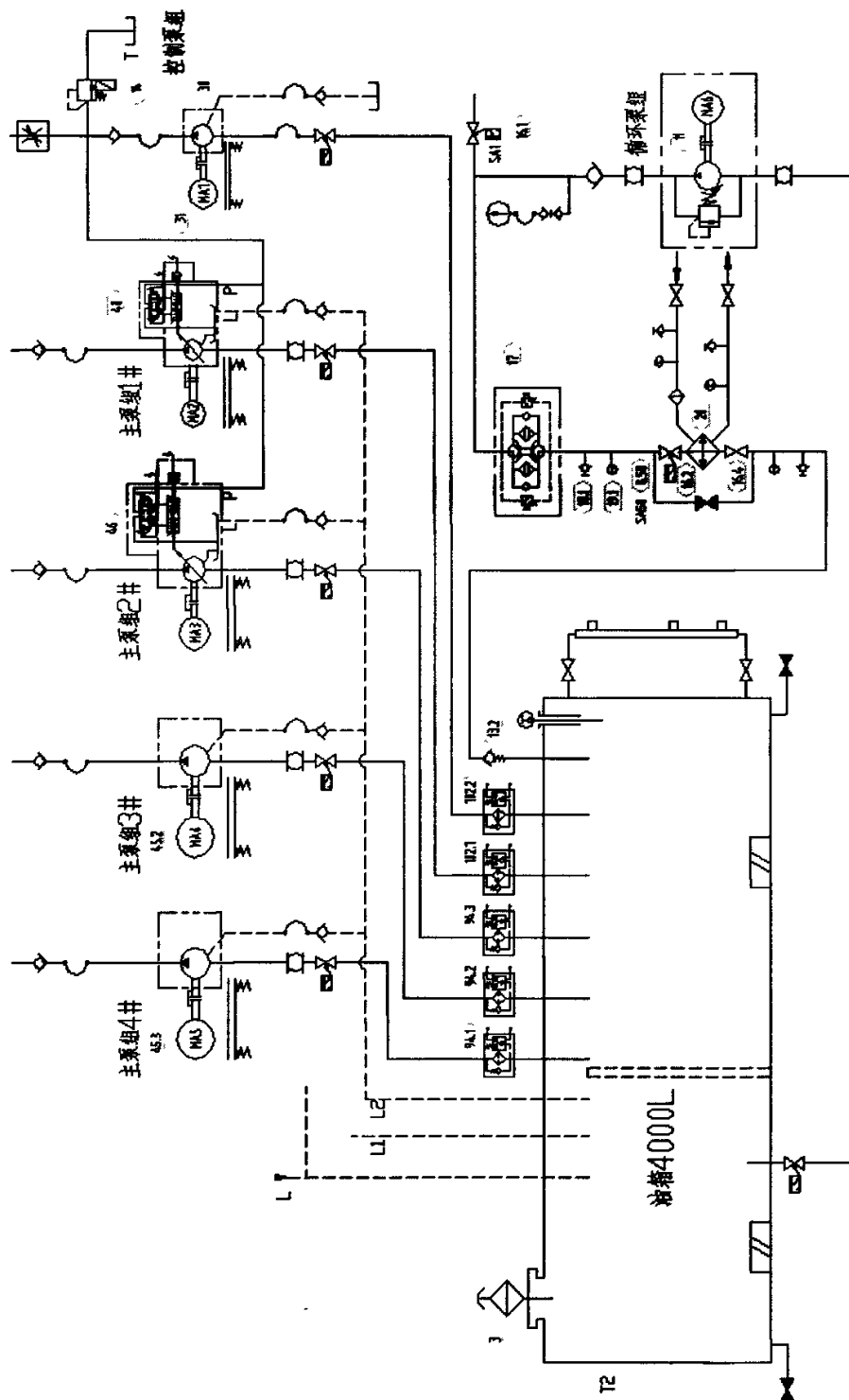


图 2.1 液压油源原理图

## 2) 伺服阀静态测试台

伺服阀静态测试台设计的目的是用于检测电液伺服阀的各种静态特性，标准的静态性能试验液压回路如图 2.2 所示。高压球阀 51.10 是电液伺服阀静态试验回路进油总阀门；通过球阀 51.11、51.12、51.13、51.14、51.15、51.16、51.17 的开、关组合，可以测试电液伺服阀的静态特性。球阀的开关状态由各自配套的接近开关检测并将信号返回计算机。国标中电液伺服阀关闭控制油口试验所要求测试电液伺服阀两控制油口的压力分别由压力传感器 64.2、压力表 34.6 和压力传感器 64.1、压力表 34.7 测定，回油压力由压力传感器 52.3 和压力表 48.4 测定，流量由流量计 65.1 测定。国标中电液伺服阀打开控制油口试验要求测试电液伺服阀两控制油口之间的流量，设计有流量计 65.2，如要求对电液伺服阀加载，完成流量对负载压降特性的试验，则关闭球阀 51.15，通过节流阀 93 加载。

电液伺服阀静态测试台可完成国标中电液伺服阀的各种静态试验包括进油口耐压试验、回油口耐压试验、关闭控制油口试验（含压力增益试验、零点的分辨率和阈值试验、零偏和零漂试验、供油压力零漂试验、回油压力零漂试验、油温零漂试验和内泄漏试验）、打开控制油口试验（含空载控制流量对输入电流特性试验、遮盖状态控制流量对输入电流特性试验、零区以外的分辨率和阈值试验、控制流量对负载压降特性试验）、耐久性试验和压力脉冲试验。

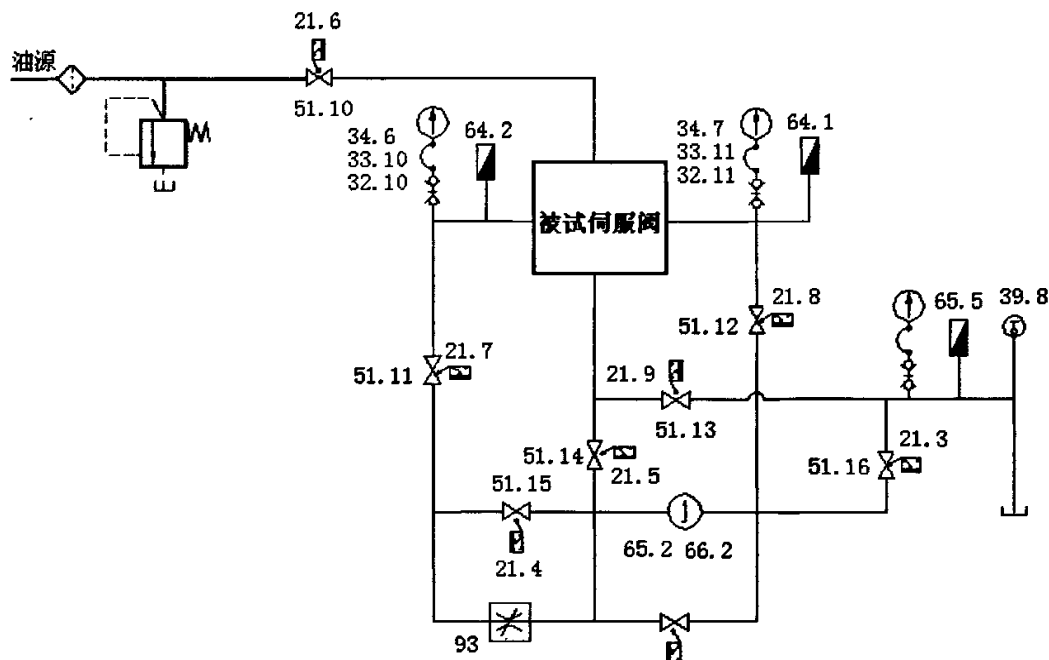


图 2.2 静态测试台液压回路图

### 3) 伺服阀动态测试台

电液伺服阀动态测试台设计目的是用于检测电液伺服阀的动态特性。动态性能测试回路如图 2.3 所示，高压球阀 51.6 是电液伺服阀动态试验回路进油总阀门，球阀的状态由各自配套的接近开关检测并将检测信号传给计算机，设计有蓄能器 68.3、68.4（最高工作压力 31.5MPa），用于蓄能、瞬间补充流量和吸收冲击等作用，设计消振容腔 100 用于回油消振。流过电液伺服阀控制油口之间的流量，是通过检测与动态液压缸活塞杆固定一体的速度传感器 99（最大量程  $\pm 10\text{m/s}$ ）输出信号实现的，设计有位移传感器 96.2（量程  $\pm 100\text{mm}$ ，对应输出信号为  $4\sim 20\text{mA}$ ）用于纠偏，控制油口压力由压力传感器 64.5、64.6 测定并将检测信号传给计算机。

电液伺服阀动态测试台可完成国标中电液伺服阀的各种动态试验，包括瞬态响应试验和频率特性试验。

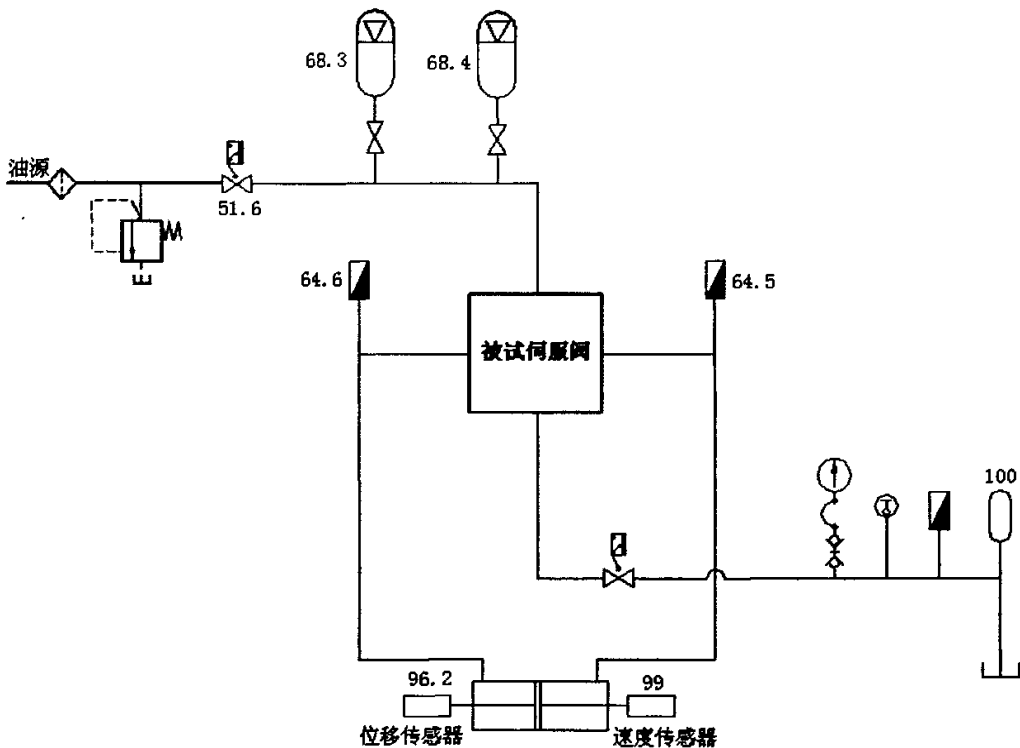


图 2.3 动态测试台液压回路图



## 2.3 测试系统总体方案设计

### 2.3.1 电液伺服阀常规测试方案

电液伺服阀在电液控制系统中有非常重要的作用,电液伺服阀的性能测试一直受到重视。在伺服阀 CAT 的应用研究方面,许多单位已做了很多的研究工作,实现形式也是多样的。电液伺服阀的测试包括离线测试和在线测试两种形式。离线测试需要专门的试验台设备,测试精度高,适用于对伺服阀进行全面的测试和调校。在线测试在伺服阀不拆离原来设备的情况下进行;在线测试虽然方便,但是往往受到伺服阀应用场合的限制,不容易实现。本文主要对电液伺服阀的离线测试方案和关键技术问题进行研究。

传统的电液伺服阀测试方法具有检测准确性较差,人为因素影响较大,检测速度较慢等缺点。以计算机为基础的辅助测试系统(CAT)通过建立一套完整的数据采集和控制系统将试验台各个部分有机联系起来,可以构成一个功能全面的、高精度的测试平台,对测试过程中的压力、流量、转速、温度、扭矩等大量的数据进行高速、高精度、全自动的采集、处理和分析,通过丰富直观的各种图表、曲线实时显示试验的结果。CAT 技术在电液伺服阀的测试过程中占有非常重要的地位,新开发的各种原理结构的伺服阀测试系统都不可避免地采用以计算机(或高速数字处理芯片)为基础的方案。

电液伺服阀测控系统的实现形式是多种多样的。通过不同的方式将现有微型计算机、单片机或 DSP 系统、虚拟仪器技术、总线技术和软件技术组合起来,可以实现功能相似但结构、成本、测试精度和功能差异非常大的 CAT 方案。目前主要的测控方案的构成有如下几种:

1) 微型计算机和单片机(或 DSP)的组合方案<sup>[18]</sup>——这种方案使用微型计算机和单片机组成的主从结构,微机一般只完成信号编排、信号处理、绘图输出功能,单片机完成发送信号、数据采集和控制功能。实现这样的方案需要开发可靠的硬件测试装置,开发周期长,工作量大,一般只在需要批量提供可用于工业过程产品测试的装置时才优先选用。这种测试方案实现成本低,由于计算机本身不承担任何重要的控制功能,计算机操作系统和应用软件的缺陷不会对测试过程中的安全性和可靠性造成影响。

2) 微型计算机和 GPIB 接口仪器(XI 总线仪器)构成的方案<sup>[19]</sup>——这种方案模拟信号的采集和处理在 DSP 板上进行,X-Y 记录仪用于绘制静态特性的曲线,相位分析仪和多通道示波器用于动态特性试验。该方案主要通过外围的具有通信功能的各种仪器与计算机一起构成一个测试系统,各外部测试仪器分别只实现一项比较单一的功能。这种测试方案是一种松散的系统,可以利用现成的装置方便地搭建一个功能比较完善的系统。如果在计算机上安装虚拟仪器软件,则可以通过非常简单开发实现一个预定功能的 CAT 系统。其缺点在于系统的成本高,构成复杂,使用的独立仪器过多,系统的体积和故障概率都会加大。

3) 完全以 PLC 为基础的测试系统<sup>[20]</sup>, 这种测试方案的不可能实现高速高精度的测试, 对于频率特性测试和瞬态响应测试无能为力, 只能够进行一些比较常规的静态特性测试。

4) 单纯以工控机和数据采集卡为核心的测试系统<sup>[21]</sup>。这种测试系统可以利用高速数据采集卡和复杂的数据处理算法实现非常精确的测试, 但是这类测试系统的将对液压平台的所有控制功能都集中在计算机上, 对计算机的要求较高。根据大量工业过程的实践和统计表明, 在一般的过程控制中 PLC 的可靠性要高于工控机, 不会出现由于操作系统或应用软件故障导致系统停止或瘫痪。

5) 工控机+数据采集卡+PLC 构成的系统<sup>[22]</sup>, 这种测试方案的测试精度也比较高, 功能扩展灵活, 结构简单。

6) 完全以 DSP 等高性能数字处理芯片为基础的测试方案。这种测试方案是可行的, 只要软件和硬件设计适当, 测试精度、测试速度和可靠性都会有保证, 测试装置的体积也会很小。但是实现这样的方案开发成本较大、开发周期长, 如果不是大批量生产开发这样的系统从成本角度考虑是没有必要的。

### 2.3.2 分布式测试系统总体方案

基于电液伺服阀常规测试方案, 考虑到本课题开发的测试系统是一个具有远程监测功能的分布式测试系统, 在保证测试速度的同时, 必须保证测试精度, 因此设计了以液压试验平台为基础、以 PLC 为现场控制中心、工控机为数据处理单元、触摸屏提供人机交互平台的分布式测试系统。电液伺服阀分布式测试系统整体结构如图 2.4 所示。

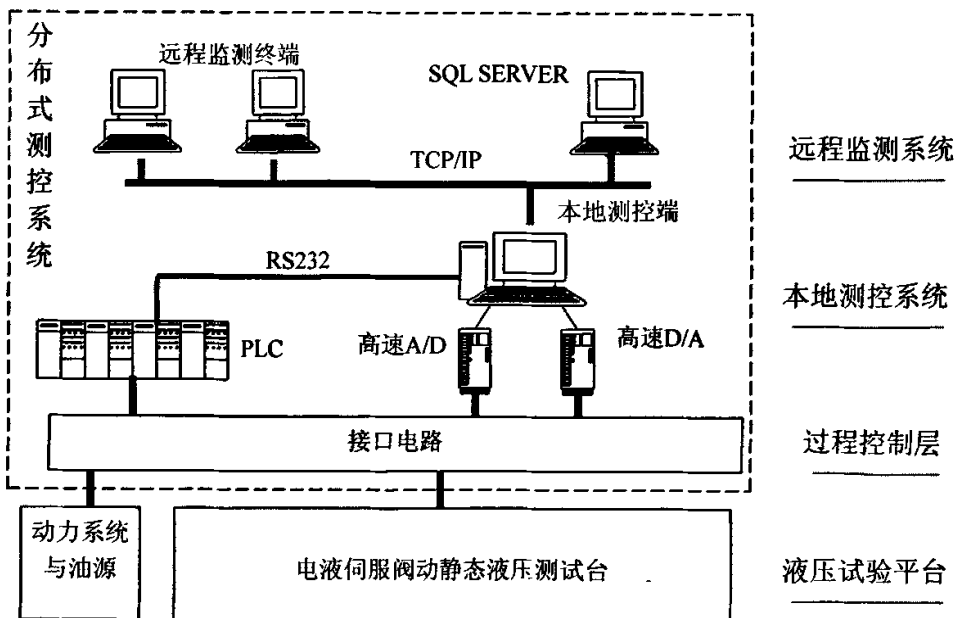


图 2.4 分布式测试系统结构

从整体结构而言,电液伺服阀分布式测试系统主要分为两大部分,一是液压试验平台,其详细结构在前面已有阐述;二是分布式测控系统,包括各种接口电路、PLC 系统、本地测控系统及远程监测系统,各部分相互配合,实现电液伺服阀性能测试的自动化。在功能上,分布式测控系统可以划分为三个层次:1)过程控制层;2)本地测控系统;3)远程监测系统。

**过程控制层**——过程控制层最主要的是硬件接口电路和过程控制 PLC。硬件接口电路主要包括各种控制放大电路(如泵控制放大器,伺服阀控制放大器等)、硬件滤波电路和控制继电器等。过程控制 PLC 能对系统中主要的执行器件如泵、电机、各种溢流、旁路节流阀进行控制,能够通过外部的压力、流量、位置和温度传感器等采集液压测试回路的各个环节的参数。

**本地测控系统**——本地测控系统在系统中具有非常核心的作用。本地测控系统在高速 AD/DA 控制卡的支持下可以以非常高的速度(100k/s)测量液压回路若干关键环节的过程参数。根据液压伺服阀测试的基本要求,本地测控系统的数据采集与控制主要用于伺服阀的动态特性测试回路,在伺服阀频率特性测试过程中,本地测控系统必须以非常高的速度输出测试所需要的测试激励信号,同时高速测量测试系统的输出信号。本地测控系统还承担了高速复杂的数字处理和试验结果显示功能,在所有的试验过程中本地测控系统直接或通过 PLC 采集的过程数据必须根据测试标准的要求进行处理,这种处理可能是比较简单的比例变换、平滑滤波,也可能涉及到非常复杂的数字处理算法如 FFT 等,具体的数据处理方法与试验的要求有关,相关细节将在本文后续部分介绍。本地测控系统的另一个非常重要的功能是通信网络的管理,本地测控系统必须将试验过程中的各种必要的试验数据实时发送到远程的监控计算机,同时处理远程的监控计算机发出的各种控制和管理请求。

**远程监测系统**——远程监测系统提供了通过计算机网络在远离试验设备的地方监测试验过程的手段。在软件系统的支撑下,使用者通过远程计算机对试验过程的观测就如同在试验现场一样,而且系统可以支持有多个远程的监控系统对试验过程进行监视。在远程系统开发过程中,赋予了远程用户监测及控制试验过程的权力,但在实际应用中,远程用户的控制限受到限制,一般仅具有监测功能。

该分布式测控系统的优点在于,采用 PLC 作为测控系统现场控制的核心(试验平台中几乎所有的执行器都按照 PLC 发出的控制信号进行运转的),负责试验平台低速通道的数据采集及试验过程的管理控制,通过对来源于上位工控机、触摸屏及各传感器低速通道的数据信息进行分析处理,调节测试平台中的各执行元器件的参数和状态,使测试台的各项性能参数达到试验的要求,根据相应的实验步骤自动完成实验,实现测试的自动化。采用上位工控机作为整个测控系统的数据处理中心,基于微型计算机运算速度和数据处理能力,上位工控机主要用于试验数据的处理分析,输出用户所需的试验结果及试验曲线,同时还负责试验平台中高速数据通道的采集工作,并不参与直接的现场控

制。因此即使工控机出现了问题,也不会影响到试验的正常运行,大大提高了整个测控系统的可靠性。同时,PLC 与工控机联合控制的模式,不仅发挥了 PLC 控制精度高、抗干扰能力强、可靠性好的特点,而且充分利用了工控计算机良好的数据分析和处理的能力。

### 2.3.2.1 PLC 系统

分布式测控系统以 PLC 主控单元为核心,配合使用各种功能模块、传感器和执行元件组成相对独立的工作单元,管理整个控制及测试系统和低速数据采集,完成对试验台系统的检测、控制和程序运行。PLC 与上位工控计算机采用 RS-232 数据电缆进行连接,保证通讯的可靠性。

液压试验台上多种需要检测和控制的开关和模拟量信号,测量与控制工作量大、测控点分散、信号传输路径长、工作现场电磁信号复杂。主控单元采用可编程控制器(PLC)作为主控部件。选用 MITSUBISHI 公司 Q06 系列 PLC,其 CPU 单指令执行时间达 30ns,可控点多达 8192 点,程序容量 240Kb;同时它还配套有可以直接相连丰富的功能模块,QJ17C24 通讯模块通过串口 RS232/458 数据线跟 PC 机进行通讯,在试验过程中根据事先制定好的协议,PLC 和 PC 机相互交换数据。模/数转换模块 Q68ADI 进行模拟量的低速采集,试验过程中把压力传感器和温度传感器 4-20mA 的模拟量转换成 PLC 可以识别的 0-4000 的数字量,实现了数据的测量和监视。数/模转换模块 Q68DAI 把 0-4000 的数字量转换成 4-20mA 或 0-20mA 的模拟量,对比例溢流阀、比例方向阀、伺服阀和比例变量泵的放大板进行控制,实现了数据的精确控制。输入模块 QX40 监视球阀、液位、滤油器的工作状况,通过判断工作状态正确性实现报警功能。输出模块 QY40 给被控制对象提供 24V 直流信号,可控制继电器、电磁换向阀等。通过控制继电器的通断,可以实现控制线路的切换和电机的启动。计数模块 QD62 测量脉冲信号,主要通过脉冲和流量的对应关系测量油路上的流量,替代了二次仪表。选用 A985GOT-TBA 触摸屏高性能图形终端作为 PLC 测控系统与用户进行交流的人机界面,用户通过触摸屏进行试验的选择、试验参数的设置及对试验过程进行相关的控制和调节等,同时,在试验进行过程中,对整个测控系统的状态进行实时的监控<sup>[23]-[26]</sup>。

PLC 实时测控系统软件大致可以分为四个模块:通讯模块、数据处理及过程控制模块(含相关控制算法)、监控模块和数据采集模块等等。整个软件各模块之间的关系如图 2.5 所示。

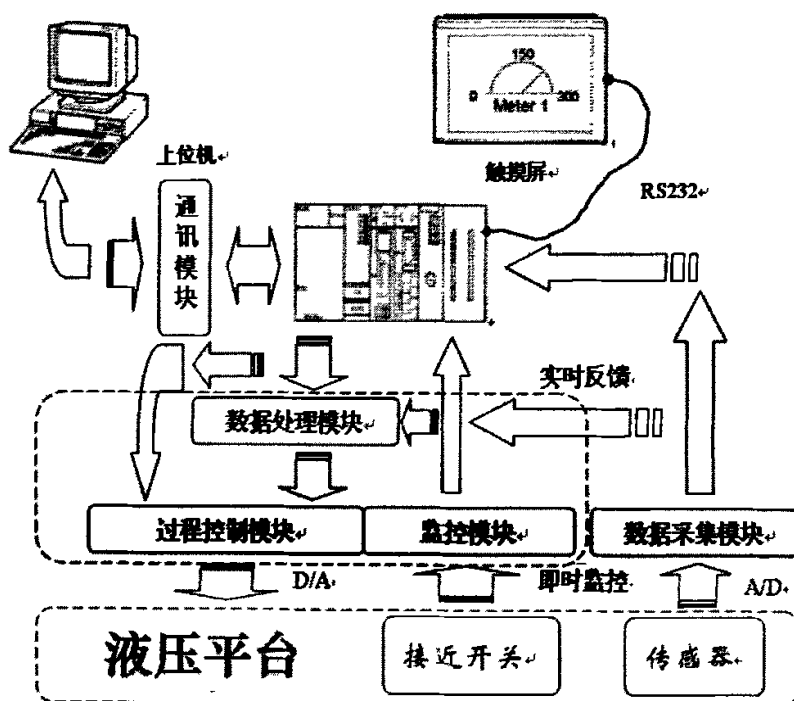


图 2.5 PLC 实时测控软件各模块关系图

通讯模块的基本功能是要保证试验过程中试验数据传输的实时性和准确性,这样才能既发挥 PLC 控制精度高,抗干扰能力强的特点,又能充分利用微型计算机良好的数据分析和处理的能力;同时,上位工控机也需要参与到 PLC 的控制中来,还涉及到一些控制指令的传输,因此保证上位机与 PLC 之间通讯的畅通显得尤为重要。系统中选用了 QJ71C24 串行通信模块来保证数据传输通道的正常运行。

数据处理及过程控制模块是整个 PLC 测控系统的核心。在测控系统中,计算机是通过硬件接口同外部被控对象发生联系的。与外部联系的方式有很多种,可以通过串行线、并行线或者其他的总线形式,也可以通过各种板卡同控制对象发生交互。本测控系统通过对来自于数据采集模块数据的计算、分析和处理,经由 D/A 或者 I/O 模块向系统中的各个伺服控制器和电控开关量发出控制信号,实时调整系统的状态和参数,使系统严格的按照试验者的要求自动完成相关试验项目的操作,实现电液伺服阀各项性能试验的自动化。

数据采集模块对测控系统中各个传感器的信号进行采集,为试验的分析和处理提供数据来源。整个测控系统的数据采集分成两个部分:低速通道的采集和高速通道的采集。低速通道的采集主要由三菱电机公司的 Q68ADI 模/数转换模块进行,它有 8 个采样通道,只能用于电流输入,转换速度为  $80\mu\text{s}/\text{通道}$ ,转换精度可达  $\pm 0.1\%$  (周围温度为  $25\pm 5^\circ\text{C}$  时);高速通道由上位机直接通过研华公司的 PCI-1716L 数据采集卡进行采集。

它具备 16 位的分辨率, 250KS/s 的采样速率, 16 个单端或 8 路差分模拟量输入, 可采用总线控制 DMA 方式进行数据传输。

监控模块是对系统中各个部分的状态进行监控, 当系统发生异常或出错时, 及时报警和采取相应的应急措施。在液压试验中, 液压试验回路正确与否对试验是否能正常顺利的完成起着决定性的作用, 因此, 监控模块的主要功能之一就是対试验回路进行监控。试验过程中, 需要通过改变截止阀的状态来形成所需的试验回路的, 利用这一原理, 监控模块就是通过判断截止阀的状态来判断液压试验回路是否符合相关试验的要求。另外, 监控模块还同时对系统中各处的状态进行监控, 将由各个传感器采集回来的数据, 在人机交互界面上显示出来, 让用户对系统的状态进行实时监测, 并设置应急按钮, 方便用户在系统出现异常时, 及时做出反应。

### 2.3.2.2 PC 机系统

PC 机系统指以 PC 机为硬件基础的测控系统, 包括本地测控系统与远程监测系统。两系统均采用了研华公司的 IPC-610 型工控机, 配备了主频为 2.4GHz 的奔腾 4 处理器, 能充分保证系统的快速和稳定性。本地测控系统中, 信号采集卡为研华 PCI-1716L, 它具备 16 位的分辨率, 250KS/s 的采样速率, 16 个单端或 8 路差分模拟量输入, 可采用总线控制 DMA 方式进行数据传输。试验中需要高速采样的信息, 通过 1716LA/D 卡的转换后被 PC 机读取, PC 机根据采集到的信息, 对高速控制过程进行及时的控制, 如频率响应试验纠偏时对位置信号的采集和处理。本系统的信号源摒弃传统的外置信号发生器, 而采用 PC 机实现信号的软件合成, 此外试验中需要高速控制的信息, 本地测控系统通过研华的 PCI-1721 高性能模拟量输出卡发出模拟信号, 然后通过外部放大板送回被控对象, 实现高速控制过程。它具备 4 路模拟量输出, 可生成最高 5MS/s 的波形输出, 能满足一般机电系统对测试激励信号的要求。

PC 机系统测控软件采用模块化开放式结构, 其基本功能是通过串行通信的方式实现本地测控系统与 PLC 控制单元低速数据信息的实时交换, 通过研华数据卡实现系统高速采样通道数据采集和控制功能, 并对源自 PLC 及高速采样通道的数据进行分析、处理, 最后输出用户所需的试验结果和试验曲线。同时通过该系统用户可以自行定义试验数据的显示位置、显示方式或对打印输出的具体格式进行个性化的定义, 对试验元件分类管理便于查找指定元件, 同时对试验数据进行分类存储和管理, 所管理的全部试验数据均提供标准的输出接口, 以方便用户能直接对试验的数据进行直接的处理和分析。

### 3 频率特性测试方法研究

【摘要】介绍了频率特性测试的互相关原理，并以互相关原理为基础设计了电液伺服阀频率特性的测试方案，研究了频率特性测试过程中的关键技术——软件信号合成、高速数据采集、动态液压缸位置纠偏、计算机信号处理。

【关键词】互相关原理 信号合成 高速数据采集 纠偏 信号处理

#### 3.1 频率特性测试的互相关原理

伺服阀频率特性测试是伺服阀性能特性测试中最复杂和困难的试验之一。目前较为常用的伺服阀频率特性测试激励信号有稳态正弦信号、随机激励信号及正弦扫频信号等三种。其中，稳态正弦信号的优点是激励大、信噪比较高、能保证响应对象的测试精度、试验方法简单，但试验周期较长；随机激励信号的频率范围宽、容易采取措施降低噪声、且便于计算机控制，但设备较昂贵；正弦扫频信号的信号频率范围确定，试验时间短、且便于计算机的测试，是目前使用较广泛的测试方法之一。它用已知频率的正弦信号激励系统，测量系统的稳态响应信号，用输出与输入的幅值比和相位差组成传递函数来定义系统的动态特性。改变频率点，即可测量出其它点的频率响应。用这种方法来进行测试的基本思想，实际就是逐点测试，测试点的间隔由测试者根据经验确定，知道被测系统的频率特性在某个范围内变化比较快，就将测试点安排密一些，若变化平稳就安排疏一些。这种信号处理方法简单、直观、测试精度较高<sup>[27][28]</sup>。

采用正弦信号作为频率特性测试的激励信号时，常用的频率特性测取方法有两种，一是通过利用互相关原理，获取一系列特定频率点处的特性后组合而成；二是使用连续正弦扫频信号作为激励信号，扫描工作频段，然后再利用互功率谱方法获取。利用功率谱的方法求取的频率特性，其曲线能十分良好的反映出被测系统在工作频段的响应趋势，但是对于较高的频率，精度不足。而利用互相关的方法获取的频率特性曲线，则能较为精确的反映出被测系统在特定频率点处的响应情况。因此本系统采用互相关原理求取频率特性。

利用互相关函数互相关原理求取频率特性的原理图如图 3.1 所示。

图中  $X(t)$  为零均值正弦信号，

$$\text{即 } X(t) = X_m \sin(\omega t + \psi_1)$$

$$\text{则 } X_r(t) = X_m \sin(\omega t + \psi_1) \phi(n\omega_0) = \phi_{xy}(n\omega_0)$$

$$X_1(t) = X_m \sin(\omega t + \psi_1)$$

$$Y_0(t) = Ym \sin(\omega t + \psi_0)$$

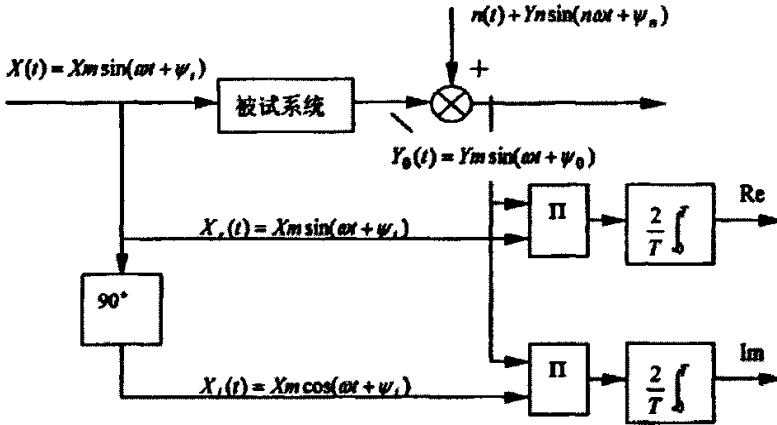


图 3.1 利用互相关原理求频率特性原理图

而检测到的输出信号包含有谐波干扰信号和随机干扰信号，

$$\text{即 } Y(t) = Y_0(t) + Yn \sin(n\omega t + \psi_n) \pm n(t)$$

因此，

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T Y(t) X_r(t) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T Xm Ym \sin(\omega t + \psi_1) \sin(\omega t + \psi_0) dt \\ &+ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T Xm Yn \sin(\omega t + \psi_1) \sin(n\omega t + \psi_n) dt \\ &+ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T Xm \sin(\omega t + \psi_1) n(t) dt \end{aligned}$$

由三角函数的正交性和  $n(t)$  的统计独立性，可以证明后两项积分当  $T \rightarrow \infty$  时趋于零。即当积分周数足够多时，可以滤掉混入输出信号中的谐波干扰信号和随机干扰信号。

$$\begin{aligned} \text{所以, } \text{Re} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{Xm Ym}{T} \int_0^T [\cos(\psi_0 - \psi_1) - \cos(2\omega t + \psi_0 + \psi_1)] dt \\ &= Xm Ym \cos(\psi_0 - \psi_1) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{同理, } \text{Im} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T Y(t) X_i(t) dt \\ &= Xm Ym \sin(\psi_0 - \psi_1) \end{aligned} \quad (3.2)$$

由上式可以求出被测系统的幅频与相频

$$Am = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad (3.3)$$



$$\psi_0 - \psi_m = \arctg \frac{\text{Im}}{\text{Re}} \quad (3.4)$$

利用计算机辅助进行频率特性测试，得到的是经过 A/D 转换后被测系统输入输出信号的采样序列[X(nTs)]和[Y(nTs)]，而且是有限的，即假定 n=1, 2, ..., N。这时，式子 (3.1) 和 (3.2) 变为：

$$\text{Re} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X(nTs)Y(nTs) \quad (3.5)$$

$$\text{Im} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X'(nTs)Y(nTs) \quad (3.6)$$

式中 X(nTs)为输入信号的正弦采样序列，X'(nTs)为输入信号的余弦采样序列。

## 3.2 频率特性测试总体方案

电液伺服阀频率特性测试系统是以计算机为硬件基础的测试系统，因此生成正弦激励信号的方法有两种：一种是单独设计可以通过计算机控制的硬件信号发生器，在计算机的控制下，硬件信号发生器连续地生成不同频率的正弦信号。另外一种是在计算机内部通过专用的硬件板卡（如研华的 PCI-1721）等编程控制，直接由计算系统向外发送正弦信号。前一种方案的缺点在于，为了使标准的正弦信号和纠偏控制信号同时施加到被试元件上，必须设计专用的信号求和硬件电路，方案比较复杂，引入外部干扰的可能性更大，所以本文采用了第二种方案。

在伺服阀频率特性性能测试中，对电液伺服阀的输出信号，即电液伺服阀输出流量的检测，目前较为成功的方法是采用动态液压缸的测量方法。该测量方法通过在伺服阀的输出端连接惯性较小的动态油缸间接测量通过伺服阀的流量。由于被试阀的工作特性不对称，在持续的正弦信号的作用下通过伺服阀阀口进入动态油缸的流量经常不一致，使液压缸活塞持续地向一端运动，并最终使活塞到达一端的终点，试验被迫停止。为了克服伺服阀工作特性不对称带来的影响，在试验过程中必须实时纠正动态液压缸活塞的位置偏移，使液压缸活塞的运动中心始终保持在中间位置<sup>[29][30]</sup>。鉴于此本系统设计了单神经元自适应 PID 纠正液压缸活塞的运动位置，然而，在纠偏控制信号的作用下，伺服阀接受的不再是标准的正弦激励信号，通过伺服阀的流量也不再是标准正弦信号作用下的流量，因此在测试数据处理过程中必须有效地消除附加纠偏控制作用对测试系统的影响，对此本系统设计了信号处理单元对干扰信号进行处理，同时按照互相关原理完成频率特性的计算。

基于上述分析，频率特性测试系统基本结构如图 3.2 所示

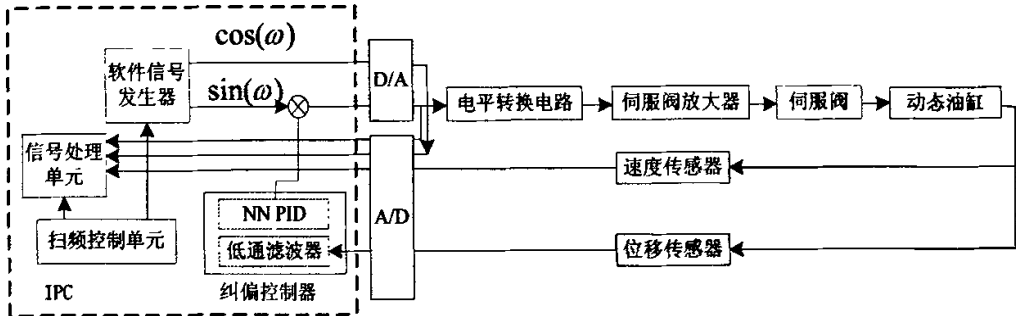


图 3.2 电液伺服阀频率特性测试系统

### 3.3 频率特性测试的关键技术

#### 3.3.1 信号的软件生成

如前所述，频率特性测试的激励信号由计算机软件生成，生成的正弦信号可以是单频率的正弦信号，也可以是由一组等差、等比、指数级关系组成的连续正弦信号序列。所有的波形输出都采用将波形数据放入 PCI-1721 卡的数据缓冲区中，经过 D/A 转化后得到。波形数据可以根据输入的参数实时计算生成，也可以是调用波形数据文件得到。一般而言，激励信号只需要一路输出即可，为了能够适用互相关原理进行频谱计算，则在 D/A 端增加一路与激励信号相位差  $90^\circ$  的余弦信号，并在 A/D 端采样，以配合原始正弦激励信号进行互相关计算，如图 3.1 所示。

由于计算机内部的缓冲区是有限的，开辟过大的缓冲区必然会影晌系统的性能，甚至会影响系统的稳定性。而且，一次试验输出的信号数据量非常的庞大。例如，以 200Ks/s 的输出率，扫描 1000 S，则整个输出的数据总数是 200 M。显然，将 200M 数据一次直接生成调用是不合适的。所以，为了更加合理的使用计算机资源，本系统对于周期信号和非周期信号输出采用不同的内存管理模式。对于非周期的信号的输出，本系统采用的是实时计算生成的办法。波形发生开始的时候，系统同时启动一个监测线程，一旦监测到半个缓冲区输出完成，立即将该半个缓冲区内数据更新，从而实现了小缓冲区，大数据量的输出。软件流程图如图 3.3 所示。因为 PCI-1721 板的 API 函数不提供缓冲区半空事件，因而采用常规的方法无法获取缓冲区半空的标志。本系统采用的方法是，将板卡的 FIFO-OUT 端口引入到板卡的 82C54 计数器输入端，通过监测线程不断查询计数器值的变化，获取缓冲区半空的标志。使用这种办法需要消耗一定的 CPU 使用时间。经测试，本系统使用该种办法时，开启两个通道 D/A，输出率为 1MS/s，同时开启两个通道 A/D，每个通道采样率为 100 Ks/s，并将采样的数据实时存盘，整个系统的负荷低于 30，完全可以满足同时处理其他任务的需要。而且，稍加上简单的计算机编程，就可以实现需要昂贵的信号发生器才可以实现的功能。输出的精度和速度也能够

满足一般机电系统的测试需要<sup>[33]-[35]</sup>。

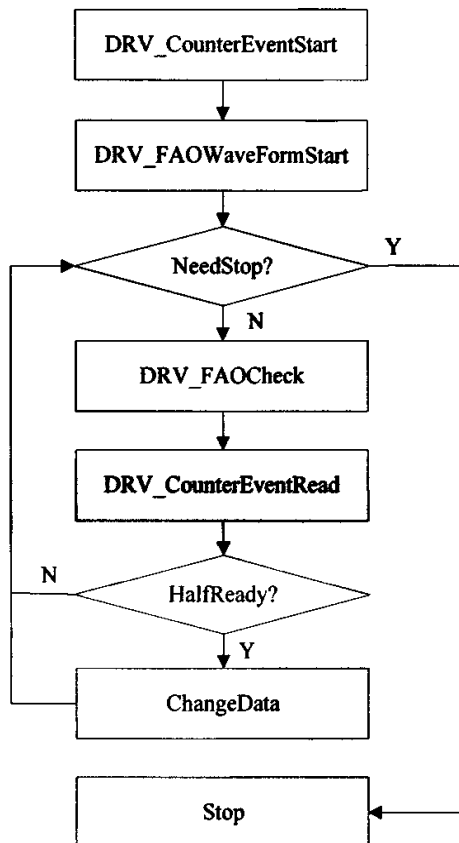


图 3.3 非周期信号输出流程图

### 3.3.2 高速数据采集

如图 3.2 所示，系统中需要采集的信号有 4 路，两路激励信号，正弦信号与纠偏信号的拟合激励信号和余弦激励信号，一路输出信号即速度传感器的信号，一路反馈信号即位移传感器的信号。由于电液伺服阀的频响一般较高，若数据采集速度低，则无法采集到一个周期内完整的数据信号，所以数据的采集速度要求很高，并且要严格保证采样间隔的精确性。而 Windows 是一个多任务的操作系统，这种多任务机制具有优先级和时间片特性：任务自动被 Windows 占有，CPU 则被分配给下一任务（如果存在的话）；操作系统完全控制任务，并防止一个任务独占系统。因而对于具有严格的实时性，如实时采样、实时控制等要求的测试系统，特别是动态测试系统来说，Windows 本身的特性无法满足实时性要求。例如，在实时采样中一般严格规定 1 秒种采样  $N(N>1000)$  个数据，而 Windows 提供与计时相对应的是消息 WM\_TIMER，一般情况下也可进行定频采样，但 WM\_TIMER 至少有三点不符合实时要求：a) WM\_TIMER 不是异步的(即一旦产

生该消息就无条件地发送给应用程序),而是排队的(需要待应用程序主动检索它);b) WM\_TIMER 是低优先级的消息,它在应用程序中的其他消息处理完之后才被处理。如果一个应用程序队列中只含 WM\_TIMER 或/和 WM\_PAINT(同样是低优先级),而另一个应用程序队列中含有 WM\_TIMER 和 WM\_PAINT 以外的消息,则 Windows 的任务调度器使另一个应用程序获得对 CPU 得控制权;c) Windows 在应用程序的消息队列中只为一个计时器保存一条 WM\_TIMER 消息。如果消息队列中已存在一条 WM\_TIMER 消息,而 Windows 又要向其中放置另一条 WM\_TIMER 消息时,Windows 就将它们合并为一条 WM\_TIMER 消息,从而导致应用程序不可能得到全部的 WM\_TIMER 消息。所以经过上面分析和实验证明,利用 WM\_TIMER 进行的数据采集,无法达到严格的实时性要求,必将漏采一部分数据,同理,类似的设计也无法实现实时控制。

经分析发现,当计算机的一个外部中断发生时,系统硬件决定 CPU 从该中断向量表中取出该中断事件所对应的中断处理程序的地址,然后转到该地址执行中断服务程序,即中断发生时中断了 Windows 的执行,进入中断服务程序,从而保证了良好的实时性。但是,作为中断服务程序需要常驻在一个固定的内存区域,而 Windows 在统一管理系统内存资源中,往往做一些移动来抛弃内存部分程序和数据以达到高效使用内存的目的,此时中断服务程序的位置就会发生变化,但 Windows 没有提供自动跟踪中断向量的功能,从而导致中断无法继续正常进行。为保证中断服务程序的位置不会有所变化。通常办法就是将该程序设计成动态链接库(DLL)的形式。动态链接库是一个包含了若干个函数的可执行模块,一般不能单独运行,仅当调用它的应用程序或 DLL 被执行时它才被调入内存。一个 DLL 在内存中只有一个实例,如果有多个应用程序使用同一个 DLL,那么它们将共享内存中的同一个实例。DLL 实例自己维护一个引用计数,当需要装入一个 DLL 时,而它在内存中已存在时,Windows 仅增加该引用计数,并使应用程序中对一个 DLL 函数的调用都是调用内存中相同的副本。当一个应用程序终止时,相关的 DLL 引用计数器被减 1,仅当计数为 0 时,Windows 才将该 DLL 卸出内存。因此,使用 DLL 不但使应用程序共享代码和数据,而且也可以经济有效地使用内存。最重要的是,Windows 能保证 DLL 中固定的程序段会常驻在内存中。这就为中断技术在 Windows 中的实现提供了基础<sup>[39]</sup>。

在本测试系统中,使用研华的 PCI-1716L 采集卡,卡上有 1K 的 FIFO,而且配有驱动程序。通常板卡完成 A/D 转换,将数据写入到数据输出寄存器中,接着使用中断服务功能或 DMA 方式将数据传输到 CPU 或内存中。如果没有 FIFO(先进先出缓冲器)芯片,每次硬件完成 A/D 转换后,会改写保存在数据寄存器中的值,如果上次 A/D 的数据在新数据到来之前未被传输到 CPU,数据就会丢失了。因此在 FIFO 半满或全满时,一次性地传输数据,就可以防止数据丢失和减少使用 CPU 的时间。根据系统的特点,采用半满中断方式采集数据。在 FIFO 的半满信号产生硬件中断申请,强迫中央处理器以最快的速度去进行数据传输,所以用“FIFO+中断”的数据传递方式,可以很好的

解决实时性的问题<sup>[36][37]</sup>。

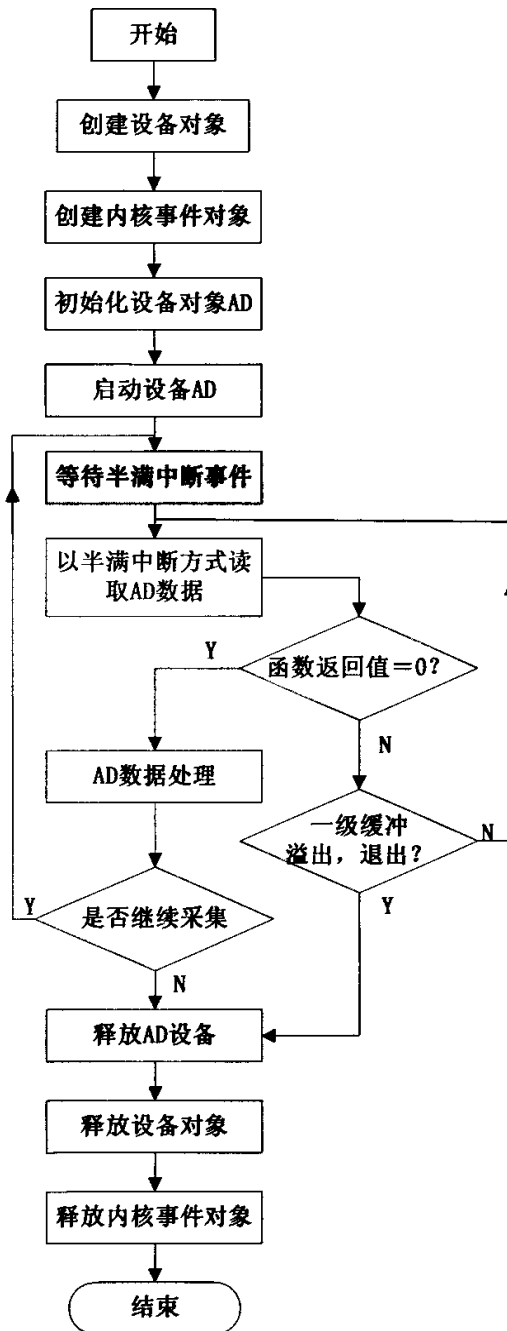


图 3.4 数据采集流程图

具体执行流程如图 3.4 所示。测试系统先用 `DRV_DeviceOpen` 创建设备对象，再调用 `DRV_EnableEvent` 函数创建一个内核事件对象，`PT_FAISStart` 函数初始化设备对象 AD，`DRV_FAISStart` 启动设备 AD。随即打开数据采集线程，调用 `DRV_CheckEvent`

函数检查工作状态，同时使用 DRV\_FAITransfer 函数把采集数据传输到用户缓冲数据区。数据采集完成后终止数据采集线程，调用 DRV\_FAIStop 释放设备及缓冲区，处理数据。

### 3.3.3 动态液压缸位置纠偏控制

根据伺服阀输出流量的测试方法分析出，频率特性测试过程中动态油缸的偏移主要是由于被试阀的工作特性不对称造成的，纠偏控制的主要目标是使动态油缸活塞的位置保持在中间位置。因此，可以认为纠偏控制系统实质上是一个以动态油缸活塞的中间位置为输入的位置控制系统。纠偏控制系统的结构如图 3.5 所示。但是该位置控制系统与一般液压位置控制系统有两点明显的不同：

1) 纠偏位置控制系统中伺服阀是不确定的，因此不可能对伺服阀的技术参数进行任何的假定，设计的控制器必须不依赖于伺服阀传递函数的精确描述。

2) 由于伺服阀在连续的正弦激励下运动，纠偏控制系统的位置反馈信号，必须从动态油缸连续的正弦运动中计算出动态油缸活塞各次运动偏离液压缸中间位置的幅度，并以此作为纠偏系统的位置反馈信号。

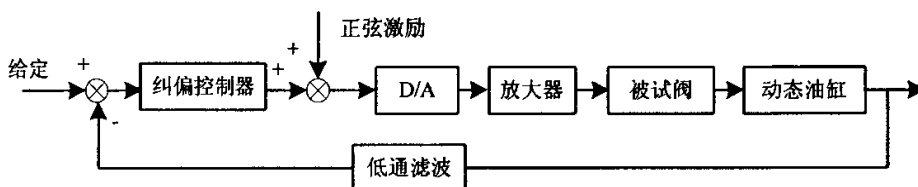


图 3.5 纠偏控制系统结构

传统的 PID 控制器具有不完全依赖于系统精确数学模型的特点，由于其技术成熟，在过程控制中得到了广泛的应用。但由于 PID 的参数不易实现在线调整，故在实际应用中影响控制品质。本文将如图 3-6 所示的单神经元自适应 PID 控制算法应用到纠偏控制过程中<sup>[42][43]</sup>。单神经元自适应 PID 是 PID 控制与神经网络控制技术相结合的产物。常见的增量式 PID 控制规律可用差分方程表示为：

$$\Delta u(k) = K_I e(k) + K_P \Delta e(k) + K_D \Delta^2 e(k) \quad (3.7)$$

式中， $K_I$  为积分系数， $K_I = K_P T_0 / T_I$ ； $K_P$  为比例系数； $K_D$  为微分系数， $K_D = K_P T_D / T_0$ ； $\Delta^2$  为差分的平方， $\Delta^2 = 1 - 2Z^{-1} + Z^{-2}$ 。

取  $x_1 = e(k)$ ， $x_2 = \Delta e(k)$ ， $x_3 = \Delta^2 e(k)$ ， $\omega_1 = K_I / k$ ， $\omega_2 = K_P / k$ ， $\omega_3 = K_D / k$ ， $k$  为一常数， $\eta_I, \eta_P, \eta_D$  为学习率；按照(3.8)式对单神经元进行训练并计算控制增量。

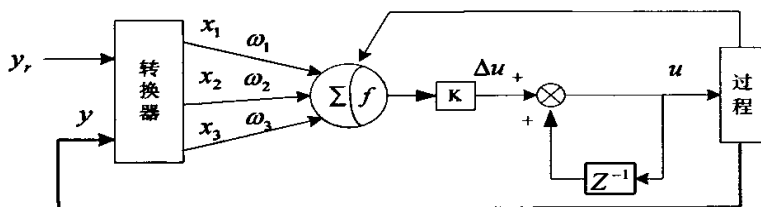


图 3.6 单神经元自适应 PID 控制

$$\left\{ \begin{array}{l} u(k) = u(k-1) + k \sum_{i=1}^3 \omega_i'(k) x_i(k) \\ \omega_i'(k) = \omega_i(k) / \sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)| \\ \omega_1(k) = \omega_1(k-1) + \eta_I z(k) u(k) x_1(k) \\ \omega_2(k) = \omega_2(k-1) + \eta_P z(k) u(k) x_2(k) \\ \omega_3(k) = \omega_3(k-1) + \eta_D z(k) u(k) x_3(k) \end{array} \right. \quad (3.8)$$

上述算法中由于能对积分系数、比例系数和微分系数进行动态修正，可以很好地对为频率特性测试过程中动态油缸的偏移进行补偿。

### 3.3.4 数字信号处理

根据前面的介绍可以看出，在频率特性测试过程中采集的信号除了有一定程度的外部干扰以外，最为明显的是在整个测试过程中被测试元件都是在标准正弦信号和纠偏控制信号的联合作用下运动，所以检测到的伺服阀流量也是复合信号作用的结果，与单一标准正弦信号激励下的流量有比较显著的差别。因此，采用信号处理的方法从实际测量的流量信号中将包括纠偏控制作用在内的干扰量予以消除是非常必要的。在逐点频率测试系统中，我们关心的是在给定频率 Hz 的激励信号作用下，被测系统在相应的频率 Hz 点上的响应特性，即对于给定的一组试验数据我们只关心一个频率 Hz 点上的信号。所以可以通过傅立叶变换的方法将采集到的输出信号变换到频域下，然后将除了需要的频率外的其它频率的能量置为 0，再通过傅立叶反变换的方法将处理后的信号变换到时域，这样可以基本消除干扰信号的作用<sup>[44][45]</sup>。基本原理如图 3.7 所示：

将采集到的一组时域内输出信号，通过快速傅立叶变换得到频率为 Hz 的频域信号，将其他频率的能量置零，再经快速傅立叶逆变换将频域信号变换到时域信号，此时得到的时域信号即为系统无干扰下的输出信号。

具体做法如下：

傅立叶变换的原始公式为:

$$y(kf_0) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi kn/N}, k=0,1,2,\dots, N-1$$

$$y(nT_s) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) e^{j2\pi kn/N}, n=0,1,2,\dots, N-1$$
(3.9)

当只关心某一频率的信号时,可以令傅立叶变换的原始公式中的  $k$  为指定的频率  $Hz$ ,则由时域内采集到的信号得到指定频率信号的傅立叶变换为:

$$y(Hz) = \sum_{n=0}^{N-1} y(nT_s) e^{-j2\pi Hz nT_s}$$
(3.10)

由此可剔除其他频率的干扰信号,而且计算处理速度比常规的 FFT 更快。互相关原理的计算是时域内的信号,因此指定频率点的信号必须变换到时域,则时域内的所得信号为:

$$y(nT_s) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(Hz) e^{j2\pi Hz nT_s}, n=0,1,2,\dots, N-1$$
(3.11)

根据互相关原理的频率特性计算方法,将软件信号发生器产生的正弦及余弦数字信号经过 D/A 转换后再统一经过 A/D 采样,分别作为输入信号的正弦采样序列  $X(nTs)$  及余弦采样序列  $X'(nTs)$ ,以及  $Y(nTs)$  傅立叶反变换得到的系统信号作为系统的输出响应信号,由此构造出满足互相关原理频率特性测试方法的信号,然后将其代入(3.3)、(3.4)、(3.5)、(3.6)计算公式,由此计算得到被测元件在一定频率下的幅值增益和相位。根据被测元件在一系列频率点上的幅值增益和相位可以绘制出被试液压元件的伯德图。

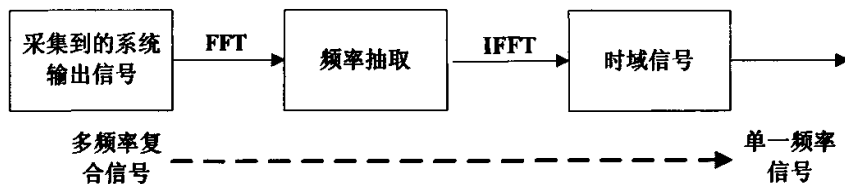


图 3.7 数字信号处理方法



## 4 分布式通信系统设计与实现

【摘要】提出了分布式数据通信系统的基本结构，设计了本地及远程通信的通信格式、数据交互机制，以及远程 PC 控制权的申请、确认和释放机制。并按照控制权归属地的不同分别设计了测试数据的广播方式，最后研究了针对特殊情况下的数据请求与响应机制。

【关键词】本地通信 远程通信 通信格式

### 4.1 分布式通信系统整体结构及要求

分布式通信系统分为两个主要部分(如图 4.1)，一是本地串口通信系统，实现本地 PC 服务器与下层 PLC 之间试验代号、试验启动、试验参数、低速试验数据、试验停止等相关数据的相互交换；二是远程网络通信系统，实现远程主控 PC 与本地 PC 试验命令、试验参数、以及确认信息的交换，同时实现本地 PC 对远程所有用户的试验数据的广播。在此需要申明的是，本文在设计远程通信机制时，赋予了远程客户对伺服阀性能测试过程的监测与控制功能，但为了避免试验现场出现意外紧急情况但无人监控状态而造成事故，在实际应用中对远程客户的控制权限设有一定的限制，一般仅具有监测功能。

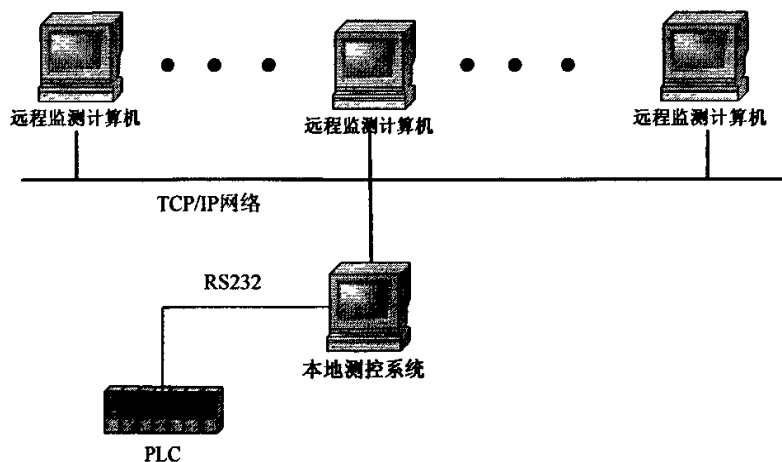


图 4.1 分布式通信系统整体结构

按通信流程的不同，将试验台的主控用户分为两类，一类是本地 PC 用户，一类是远程 PC 用户。本地 PC 为试验主控用户时，与试验相关的所有控制命令及试验数据通过串口通信系统下传给 PLC 的同时，通过网络通信系统广播给网络系统内

的所有其他用户，控制命令信息无需中转，仅 PLC 上传的低速数据需经过本地 PC 中转后才能发送给远程 PC。当远程 PC 为试验主控用户时，试验数据先由网络通信系统传递给本地 PC，本地 PC 经串口通信传给 PLC，在收到 PLC 的确认后，本地 PC 经网络通信返回确认信息给主控用户，该用户收到本地 PC 的确认后，继续进行下一步操作。试验过程中，系统的试验数据，由 PLC 经串口通信上传给本地 PC 或由本地 PC 直接控制采集卡采集，本地 PC 通过网络通信广播给系统内的所有远程用户。经过以上分析，本地 PC 是连接 PLC 及远程 PC 的中间系统，处于通信系统中的中心位置，起承上启下的关键作用。

在本地测控系统与 PLC 系统通信设计中，考虑到串行通信具有线路简单、应用灵活、可靠性高等优点，并且普通计算机上均有串行口，所以通常上位计算机与 PLC 之间的通信采用串行通信的方式。计算机网络技术的发展，使远程监控技术的研究进入到一个新的领域—网络远程监控，使远程监控技术发展到一个新的阶段。采用网络进行远程监控是计算机网络技术和远程控制技术发展的必然结果<sup>[50]</sup>。TCP/IP 协议是事实上的工业标准协议，是迄今为止最广泛应用的网络通信协议，被用于当今最大的开放式网络系统 Internet 上，它的开放性、抗毁性和可靠性是我们进行网络设计与开发所强调的。所以所有 PC 间的通信采用以 TCP/IP 网络为基础的方案。

针对电液伺服阀测试的总体功能和设计目标，对数据通信系统的要求可以归纳为以下几个方面：

1) 实时性：通信系统应当能够保证测试系统内部的计算机之间和 PLC 与计算机之间的高速数据通信要求。在试验状态发生变化或需要通过远程终端向测试物理系统发送控制命令时通信系统必须及时将测试命令和数据信息准确转送到系统内所有接点。网络系统内部所有数据的更新延迟一般不能大于 10ms。

2) 可靠性：系统采用分布式结构，根据设计目标远程终端可以在一定的条件下实施对试验过程的全面控制。在通信设计时应当考虑到在网络故障或远程终端出现故障条件下不能对试验过程进行有效控制时的安全问题，避免使测试系统处于一种完全不受控制的异常状态。

3) 一致性：在分布式结构中，所有远程终端显示的数据应当是准确一致的，不能因为时间或物理上的差异导致显示数据的不一致。这方面需要主要需要考虑的因素包括：

- i) 由于物理连接不可靠或操作系统的缺陷导致数据的丢失和不完整。
- ii) 由于远程终端接入时刻不一致导致的数据不完整。例如在某试验进行过程中有一个新程终端加入测试网络，如果新加入终端只能接收到加入时刻以后的测试数据，则有可能数据是不完整的或显示结果可能会出现错误。

## 4.2 本地串口通信策略研究

在测试系统中本地 PC 和 PLC 需要协同工作, 才能够保证试验正常进行。本地 PC 和 PLC 间协同工作的条件之一是两者之间存在可靠的数据交换机制, 两个部分之间能够按照统一的格式发出或理解对方发出的数据信息。因此, 设计一种可靠的 PC 和 PLC 之间的通信机制是非常关键的。

### 4.2.1 数据帧格式定义

PC 机与 PLC 间的通用数据通讯协议格式<sup>[52]</sup>如表 4.1; 数据通信中每个数据帧以 0x05 开始, 此后用两个字节格式表示随后的数据长度(数据长度表示数据区的数据长度和控制命令的长度之和, 以字节为单位)。在数据帧的末尾用两个字节对数据帧进行校验。和数校验码是数据长度、控制命令和数据区中每个字节的数据值进行相加后的总值的低 16 位, 在传送过程中低字节在前, 高字节在后。PC 和 PLC 的通讯采用串行通信, 数据位为 8 位, 采用奇校验, 停止位为 1 位, 波特率为 57600bps。

表 4.1 PC 机和 PLC 间通用数据帧格式

内容	0x05	DataLen	0xFF	Cmd	数据区	Sum
定义	帧起始位	数据区长度(双字节)	控制命令		试验代码及试验数据	和数校验码(双字节)

PC 机与 PLC 在收到对方的数据信息后, 进行校验, 如果校验正确则返回一个数据确认帧, 数据确认帧的定义如表 4.2; 如果校验出错则需要向对方返回数据报错信息, 数据报错帧格式的定义如表 4.3。

表 4.2 PC 机和 PLC 间数据确认帧格式

内容	0x06
定义	数据确认 (ACK)

表 4.3 PC 机和 PLC 间数据报错帧格式

内容	0x15	Code
定义	数据错误确认 (NAK)	出错代码(双字节)

在 PLC 与 PC 之间的所有数据帧内都包含有预先规定控制命令，PLC 与 PC 程序通过预先定义的方式对所接收的控制命令进行理解。在测试系统中定义的 PLC 和 PC 间的控制命令总共有 21 个。表 4.4 列出了系统中所有预定义的控制命令，当控制命令不同时，控制命令后的数据长度和所表达的意义有很大的区别。

表 4.4 PC 机和 PLC 间控制命令的定义

序号	命令方向	命令代码	命令作用	命令参数	备注
1	PC 到 PLC	0xFF60	改变试验号	试验代号	双字节
2		0xFF61	未定义		
3		0xFF62	查询开关量		
4		0xFF63	启动试验	试验代号	双字节
5		0xFF64	传送试验参数	试验代号+试验参数	
6		0xFF65	确认试验改变	试验代号	双字节
7		0xFF66	停止试验		
8		0xFF67	确认启动试验		
9		0xFF68	确认试验已停止		
10		0xFF69	NAK		
11		0xFF70	上位机就绪	试验代号	双字节
12	PLC 到 PC	0xFF40	确认试验改变	试验代号	双字节
13		0xFF41	上传试验数据	试验代号+采样数据	
14		0xFF42	上传系统开关量	系统开关量	4 字节
15		0xFF43	确认启动试验	试验代号	双字节
16		0xFF44	传送试验参数	试验代号+试验参数	
17		0xFF45	改变试验	试验代号	双字节
18		0xFF46	确认试验已停止	试验代号	双字节
19		0xFF47	启动试验	试验代号	双字节
20		0xFF48	停止试验		
21		0xFF49	NAK		
22		0xFF50	PLC 就绪	试验代号	双字节

#### 4.2.2 数据交互机制设计

本地 PC 与 PLC 的数据交互有主被动两种形式，一是本地 PC 主动启动试验，PLC 响应 PC 的启动；二是 PLC 主动启动，PC 被动响应 PLC 的启动。若由 PC 机用户主动启动试验，则用户在测控系统人机界面的试验管理栏中，找到目标试验名

称后，双击该名称的同时，系统自动发送 0xFF60 改变试验代号命令给 PLC，PLC 在收到该命令后，判断是否有试验在进行，若有则发送 NAK0xFF49 给 PC 机，通知改变试验代号命令失败。若没有试验在进行，PLC 发出 0xFF40 确认试验改变信息。PC 机收到 0xFF40 后，在弹出的试验参数窗口，设置试验参数，确认后，PC 机发 0xFF64 命令，将修改的试验参数发送给 PLC。PLC 判断试验参数是否有效，确认有效后，待 PLC 准备就绪，发 0xFF50 命令给 PC。PC 机收到 0xFF50 命令后，发送 0xFF63 启动命令，等待 PLC 的确认信息。PLC 收到后，发 0xFF43 对 PC 机的启动确认，随后 PC 机发上位机就绪信息 0xFF70，收到 0xFF70 后，PLC 开始循环采集系统数据，并发 0xFF41 命令上传试验数据，在上位机界面上，开始绘制试验特性曲线。

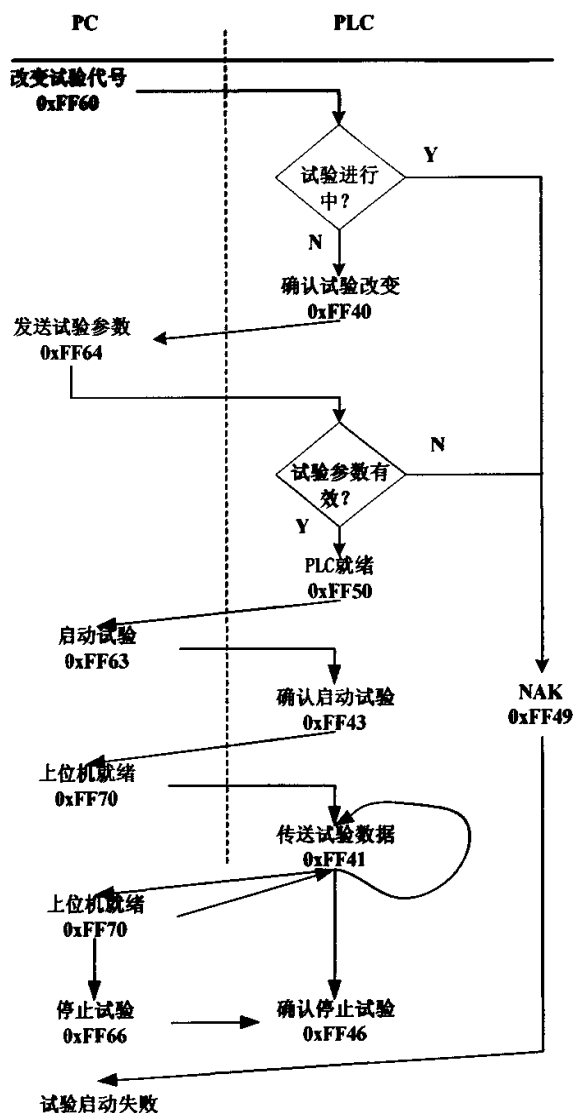


图 4.2 PC 启动试验时的通信机制

若一种性能测试试验中，有多条试验特性曲线，则在一条试验曲线完成后，PC 机再发 0xFF70 就绪命令，PLC 继续循环采集试验数据，同时使用 0xFF41 命令上传采集数据。所有试验特性曲线完成后，PC 机发 0xFF66 试验停止命令，PLC 停止试验，并以 0xFF46 命令确认试验停止。通信机制如图 4.2 所示：

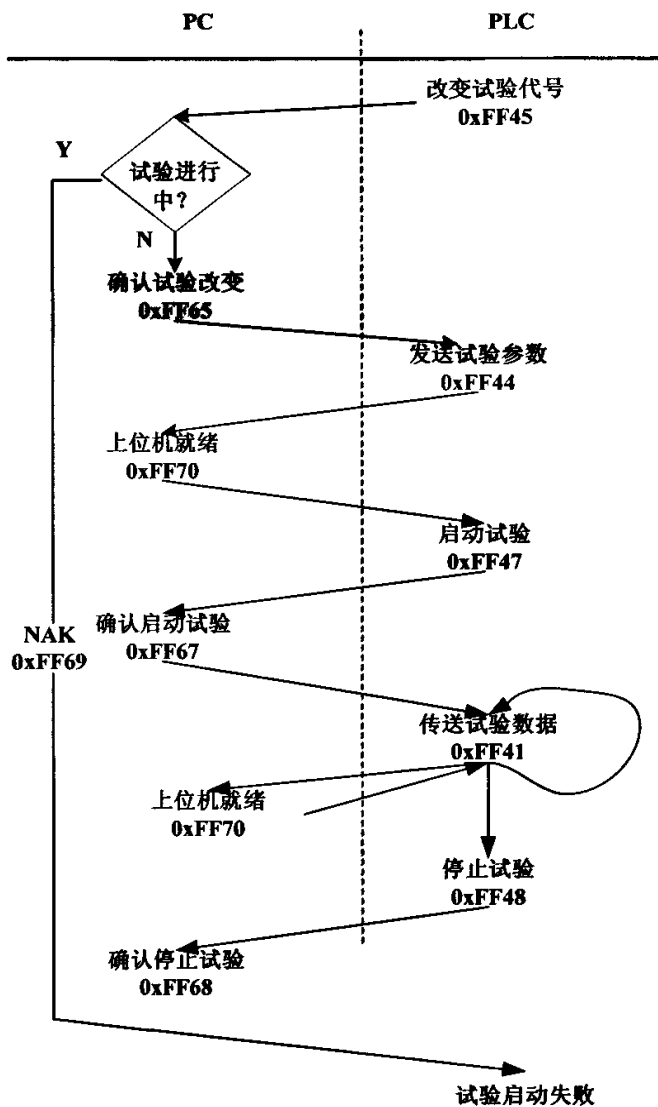


图 4.3 PLC 启动试验时的通信机制

当 PLC 主动启动试验时，在触摸屏上选择好相应的试验后，发 0xFF45 改变试验代号命令。若当前有试验正在进行，则 PC 返回 NAK0xFF69 命令，通知 PLC 试验启动失败，若当前处于无试验状态，则 PC 发 0xFF65 命令，确认改变试验代号命令，并在人机界面上弹出与试验代号相对应的试验模板。收到 0xFF65 命令后，在

触摸屏上输入所需的试验参数,并将这些参数以 0xFF44 命令发送给上位 PC 机,PC 机根据该参数修改原参数值,并发 0xFF70 命令,表明 PC 机已经准备就绪,等待试验启动。PLC 收到 0xFF70 后,在触摸屏上跳出,试验启动确认对话框,由试验人员确认后,自动发送试验启动命令 0xFF47,待 PC 机发送 0xFF67 命令对 PLC 发送的试验启动命令确认后,PLC 开始试验数据的循环采集,并以 0xFF41 命令,将采集到的实时数据上传给 PC 机。同样,当一种性能测试试验中,有多条试验特性曲线时,在一条试验曲线完成后,PC 机再发 0xFF70 就绪命令,PLC 继续循环采集试验数据,同时使用 0xFF41 命令上传采集数据。所有试验特性曲线完成后,PLC 发 0xFF48 试验停止命令,PC 停止试验,并以 0xFF68 命令确认试验停止。通信机制如图 4.3 所示。

## 4.3 远程网络通信策略研究

### 4.3.1 远程通信的建立

七十年代中期,美国国防部高研署(DARPA)将 TCP/IP 的软件提供给加利福尼亚大学 Berkeley 分校后,TCP/IP 很快被集成到 Unix 中,同时出现了许多成熟的 TCP/IP 应用程序接口(API),这个 API 称为 Socket 接口。

Socket 最早是作为 BSD 规范提出来的,并已成为 Unix 操作系统下 TCP/IP 网络编程标准,但是,随着网络技术的不断进步,Sockets 的应用范围已不再局限于 Unix 操作系统和 TCP/IP 网络。目前,Windows、WindowsNT、Windows95、OS/2、SunOS、Netware 等诸多的操作系统都开始提供套接字接口,它们在兼容 4.3BSDUnixSockets 的基础上附加了一些适应自身操作系统特性的扩充内容,这些新版的 Sockets 以操作系统内置或外挂的形式提供给程序员。Winsock(WindowsSockets)便是一个用于 Windows 系列操作系统的 Socket 版本。同时,套接字所支持的网络协议种类也不断增加,例如,Winsock 不仅支持 TCP/UDP 协议,而且支持 IPX/SPX、AppleTalk、Decnet、NetBEUI 等网络协议,Netware 的套接字支持 TCP/UDP 及 IPX/SPX 协议。另外,套接字还增加了非 C 语言支持:如 C++、BASIC、Pascal 等。

Socket 实际在计算机中提供了一个通信端口,可以通过这个端口与任何一个具有 Socket 接口的计算机通信。应用程序在网络上传输,接收的信息都通过这个 Socket 接口来实现。在应用开发中就像使用文件句柄一样,可以对 Socket 句柄进行读、写操作。套接字分为以下三种类型<sup>[53]</sup>:

字节流套接字(Stream Socket):是最常用的套接字类型,TCP/IP 协议族中的 TCP 协议使用此类接口。字节流套接字提供面向连接的(建立虚电路)、无差错的、发送先后顺序一致的、无记录边界和非重复的网络信息包传输。

**数据报套接字 (Datagram Socket):** TCP/IP 协议族中的 UDP 协议使用此类接口, 它是无连接的服务, 它以独立的信息包进行网络传输, 信息包最大长度为 32KB, 传输不保证顺序性、可靠性和无重复性, 它通常用于单个报文传输或可靠性不重要的场合。数据报套接口的一个重要特点是它保留了记录边界。对于这一特点。数据报套接口采用了与现在许多包交换网络 (例如以太网) 非常类似的模型。

**原始数据报套接字 (Raw Socket):** 提供对网络下层通讯协议 (如 IP 协议) 的直接访问, 它一般不是提供给普通用户的, 主要用于开发新的协议或用于提取协议较隐蔽的功能。

上述三种套接字分别具有各自的特点和适用情况, 在实现网络通信的过程中, 可以根据实际需要选择不同的套接字接口和网络协议。本课题采用 TCP 协议作为数据通信的传输协议, 在此主要讨论利用 Socket 实现基于 TCP 协议的网络通信具体实现<sup>[54]</sup>。

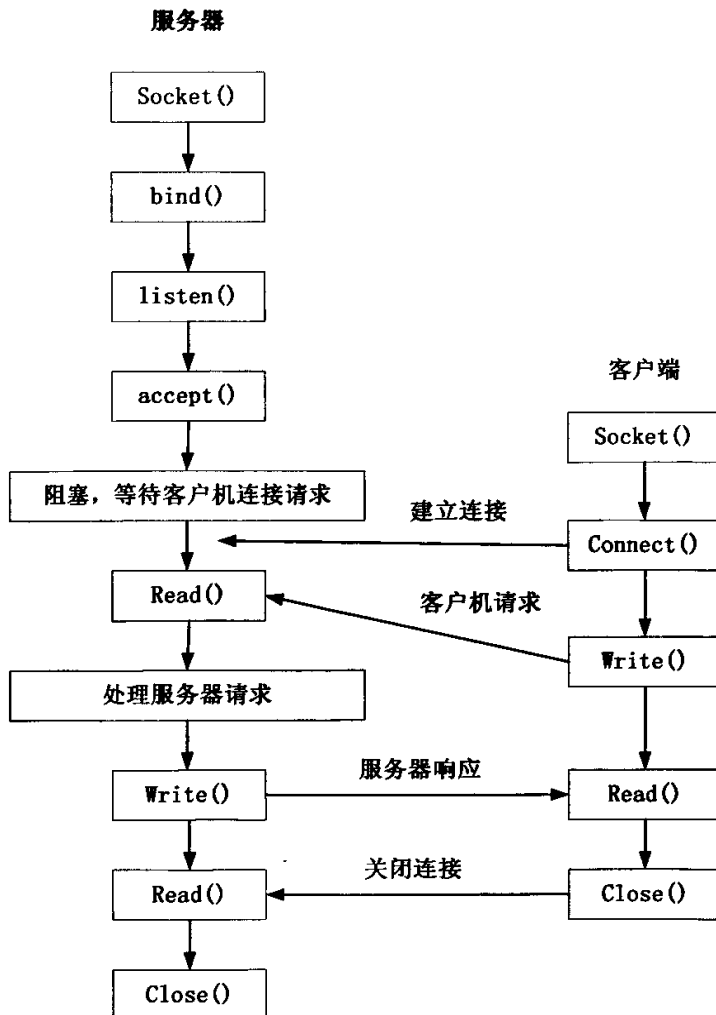


图 4.4 TCP 客户机/服务器通信模型



TCP 协议是面向连接的传输协议,主要用于实现通信双方之间的可靠数据传输,利用 TCP 协议进行数据传输的通信双方之间必然有一个建立连接——传输数据——拆除连接的过程。事实上,利用 Socket 实现基于 TCP 协议的网络通信只不过是这一过程的具体实现。图 4.4 描述了 TCP 客户机和服务器之间的交互过程,这是使用 TCP 协议进行网络通信的基本模型,服务器方首先进行初始化操作:调用函数 `socket()` 创建一个套接字,接着调用函数 `bind()` 将这个套接字与服务器的公认地址绑定在一起,然后函数 `listen()` 将这个套接字转换成倾听套接字 (listening socket),最后调用函数 `accept()` 等待接收客户机的连接请求。客户机方启动,调用函数 `socket()` 创建一个套接字,然后调用函数 `connect()` 建立与服务器的连接,在 TCP 建立连接的三次握手过程完成后,客户机和服务器就可以通过读、写套接字函数进行数据传输。通信结束后,客户机调用 `close()` 关闭套接字,服务器在处理完客户请求后也调用函数 `close()` 关闭套接字 (双向关闭)。

### 4.3.2 远程通信机制设计

远程通信系统的主要功能是将分布在不同位置的监测系统,通过 TCP/IP 网络有效连接起来,从而使所有远程监测系统的显示与本地测控系统一致并且同步更新。在远程监测系统中本地测控系统负责与实际的测试硬件系统连接,能直接从测试系统中采集各种过程数据并能实现对测试系统的控制。远程监测系统只能通过网络与本地测控系统连接和交换数据,所以本地测控系统在系统中除了承担测试过程试验控制与管理功能外,还必须承担起网络通信管理的功能。在设计网络通信管理过程中需要考虑的主要问题有:1) 数据通信格式的定义;2) 远程通信管理策略。

#### 4.3.2.1 数据帧格式的定义

在设计测控系统中为了保证软件的通用性,系统采用了基于模板的系统测试数据表示策略。在以模板为基础的测试结果管理方式中,系统的显示界面和实际的数据是相互分离的,使用者可以根据实际的测试需要自动定义测试数据的显示格式和测试保护输出的格式。测试数据保存在独立的测试文件中,实际操作测试过程中相同的测试数据可以通过不同方式表现出来。在本文的后续部分将对测试模板的设计和使用进行详细介绍。所以在测试系统通信过程中,系统内传送的数据主要可以分为三类,即:测试界面定义数据(模板数据)、试验数据、系统控制命令。在系统通信机制设计时采用了基于数据帧的通信格式。系统数据帧的定义如下表 4.5:

表 4.5 系统通信数据帧格式

0xF0	BC	CMD	数据 1	数据 2	.	.	.	XOR1	XOR2	0xFF
------	----	-----	------	------	---	---	---	------	------	------

数据帧内最大数据长度为 128 字节，数据帧中各数据位包括 XOR1 和 XOR2 两字节都采用 ASCII 表示，数据帧内各字节的定义分别如下表 4.6:

表 4.6 数据帧内各字节的含义

数据	定义	备注
0xF0	数据帧起始位	
BC	数据长度(包括命令字节、数据和校验位)	数值为 1~131
CMD	控制命令	控制命令的定义见表 4.7
数据(n)	传送数据的内容	ASCII 码
XOR1~2	数据校验位	数据校验位的计算方法: (1) $XOR = CMD \oplus \text{数据 } 1 \oplus \text{数据 } 2 \dots \oplus \text{数据 } n$ ; (2) $XOR1 = XOR1/16$ ; $XOR1 = XOR1 \bmod 16$ ; (3) 当 $XOR1 < 10$ , $XOR1 = XOR1 + 0x30$ ; 否则 $XOR1 = XOR1 + 0x41$ ; 当 $XOR2 < 10$ , $XOR2 = XOR2 + 0x30$ ; 否则 $XOR2 = XOR2 + 0x41$ ;
0xFF	数据帧结束位	

通信过程中，为方便各用户对命令代号的识别，执行相应操作，系统统一定义了命令代码的含义。分别用不同的数字，表示不同的控制命令，其对应关系如下表 4.7 所示:

#### 测试数据的表示格式说明:

i) 直接可以用一个数据表示的测试数据表示为: 数据变量名称@变量取值; 数据变量在系统中统一定义, 详细参照本论文的模板设计与实现部分。

ii) 当测试数据需要通过一系列的数据表示时, 测试数据表示为: 数据变量名称 < 变量取值 1@变量取值 2@变量取值 3@变量取值 4... @变量取值 n >;

当测试数据为 X-Y 坐标系统下的曲线时变量取值 1, 3, 5, 7... 表示 x 轴方向的坐标数据, 变量取值 2, 4, 6, 8... 表示 y 轴方向的坐标数据; 变量 1 和变量 2 表示一个坐标点。当测试数据为幅相频率特性曲线时, 每 3 个数据为 1 组分别表示频率, 幅值和相位。

电液伺服阀综合测试系统中, 对电液伺服阀性能测试项目共预定义了 17 项, 对应每一项试验均有一个指定的试验代号, 以及固定的测试控制参数, 控制命令中

传递的试验代号不同时, 对应的试验项目、传递的测试控制表达的意义以及参数个数均不相同。表 4.8 列出了系统中所有预定义的试验名称、试验代号及测试控制参数的对应关系, 以此为基础, 便于本地 PC 与远程 PC 之间对交互信息的理解与辨识。

表 4.7 系统通信过程中控制命令的定义

序号	命令代码	定义	备注
1	0x10	启动试验	数据项为试验参数, 参照试验数据参数格式定义
2	0x11	停止试验	数据项无
3	0x12	申请控制权	数据项无
4	0x13	确认控制权	数据项无
5	0x14	归还控制权	数据项无
6	0x15	拒绝控制权	
7	0x16	更新界面	数据项为显示界面模板定义数据
8	0x17	暂停试验	数据项无
9	0x18	修改试验参数	数据项为试验参数, 参照试验数据参数格式定义
10	0x19	测试数据广播	数据项为测试数据, 具体内容参照测试数据的表示格式说明
11	0x20	内部即时通信	数据项为通信内容
12	0x21	控制有效性确认	确认远程终端在实行有效控制
13	0x22	续上一帧	表示随后数据为上一帧未完成数据, 对数据的理解由上一帧控制命令确定
14	0xA1	ACK, 数据确认	数据项无
15	0xA2	NAK, 数据报错误	数据项无

表 4.8 试验代号及测试控制参数定义

序号	试验名称	试验代号	测试控制参数
1	进油口耐压试验	0x01	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 保压时间 参数 4: 试验压力
2	回油口耐压试验	0x02	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 保压时间 参数 4: 试验压力
3	压力增益试验	0x03	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 预循环次数
4	零点的分辨率和阈值试验	0x04	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量
5	零偏试验	0x05	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量
6	供油压力零漂试验	0x06	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 供油压力增量
7	回油压力零漂	0x07	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 回油压力增量
8	内泄漏试验	0x08	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量
9	空载控制流量对输入电流特性试验	0x09	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量
10	遮盖状态控制流量对输入电流特性试验	0x0A	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量
11	流量饱和控制流量对输入电流特性试验	0x0B	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量
12	零区以外的分辨率和阈值试验	0x0C	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量
13	控制流量对负载压降特性试验	0x0D	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量

表 4.8 (续) 试验代号及测试控制参数定义

14	耐久性试验	0x0E	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 循环次数
15	压力脉冲试验	0x0F	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 循环次数
16	频率响应试验	0x10	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 测试压力 参数 4: 起始频率 参数 5: 终止频率 参数 6: 频率增加模式(1-等比; 2-等差) 参数 7: 频率增量系数 参数 8: 纠偏算法
17	瞬态响应试验	0x11	参数 1: 额定压力 参数 2: 额定流量 参数 3: 阶跃幅值

#### 4.3.2.2 远程通信管理策略

远程通信管理策略的核心是建立完善的信息传递及特殊情况下数据请求的响应机制, 保证远程用户之间, 及远程用户与本地服务器间数据无冲突、无丢失、无差错地可靠传输。主要解决的核心问题包括控制权分配机制, 数据的广播机制, 以及独立数据请求机制。

##### 1) 试验控制权的申请与确认

在测试系统中, 多个监测终端可以同时显示测试动态过程, 但是只能允许有一个终端拥有对测试系统进行控制。在网络故障或远程拥有控制权的终端出现故障条件下, 本地测控系统应当及时收回对测试系统的控制权, 所以在通信网络中必须增加确认远程终端在实行有效控制的机制。

系统控制权的申请流程如图 4.5:

客户端发 0x12 命令, 向服务器请求控制权, 本地服务器收到请求后, 判断控制权是否在本本地, 若在本本地则放弃控制权, 并登记控制权的转移, 发 0x13 命令确认控制权已授权给客户端, 由此客户端对控制权申请成功, 获得了试验台的控制权。若控制权不在服务器端, 则发 0x15 命令拒绝客户的申请, 该客户无法取得控制权。

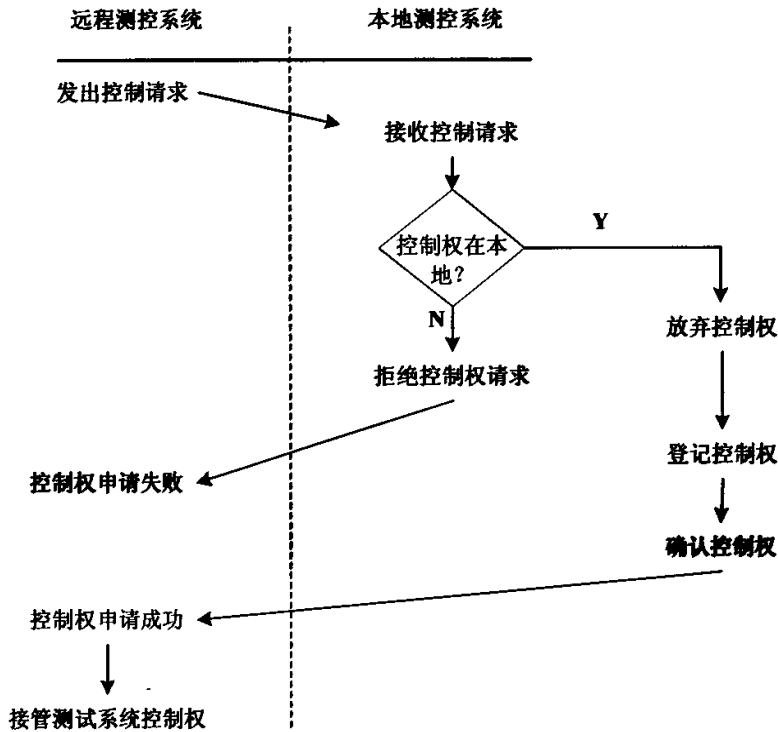


图 4.5 控制权申请流程

当远程客户完成对试验台的控制或掌握控制权的用户需临时退出试验，必须将控制权归还给本地 PC，以保证其他用户能获得控制权，图 4.6 显示了控制权归还流程。归还控制权时，由客户端发出归还请求 0x14 命令，本地系统接收到该请求后对控制权的转移进行登记，并发 0x13 命令确认控制权已变更，由此远程系统释放控制权，本地 PC 收回控制权。

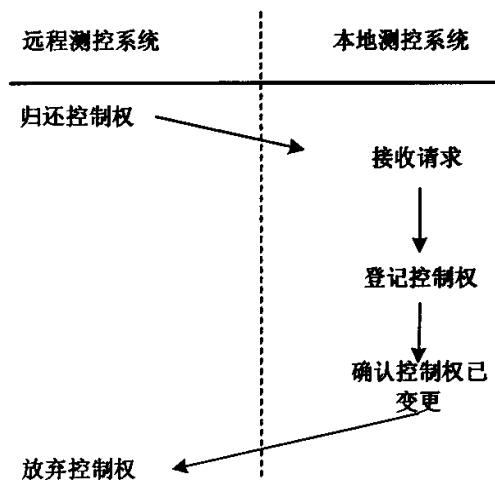


图 4.6 控制权归还流程

在试验过程中,为避免主控用户意外脱离网络系统,或丢失控制权,导致试验台处于无控制状态,本地 PC 每隔一定的时间向主控用户发送控制权确认命令,一旦本地 PC 等待响应超时或主控用户不再拥有控制权,则立即收回控制权。如图 4.7 显示了控制权确认流程。本地测控系统发出控制权确认信息,远程客户端收到该信息后判断是否拥有控制权,若有,则确认控制权有效,并将确认信息返回给服务器端,若没有,则返回控制权无效。在客户端返回控制权无效或本地 PC 端等待控制权有效性确认响应超时时,本地 PC 收回控制权,并对控制权进行登记,由本地测控系统对试验台进行控制。

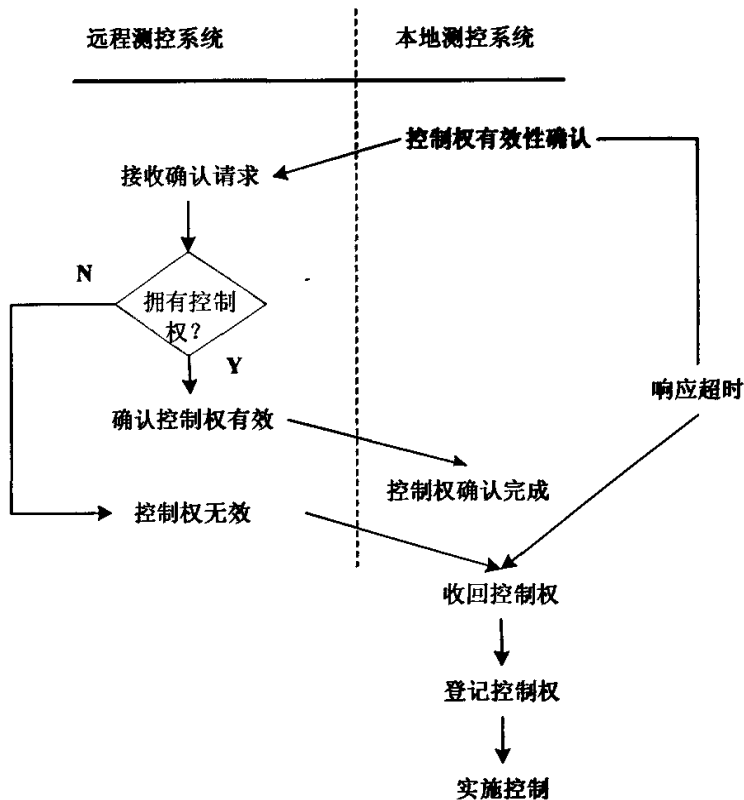


图 4.7 控制权确认流程

## 2) 测试数据与状态的广播

为了保证系统中所有的监测终端实时同步地显示测试过程的数据,系统采用数据广播的方式向系统内的所有监测终端发送试验过程中试验参数或界面的变更信息。

在本地测控系统运行后,立即建立起网络通信服务机制,随时准备接受由远程监测终端发出的连接请求,系统建立一个连接池,保存所有与本地测控系统连接的

远程监测终端的连接信息。当系统数据发生变更时,测试系统通过连接池内的数据连接依次向远程监测终端发送数据变更信息,所有远程监测单元必须单独发送 ACK(接收数据正确时)或 NAK(接收数据异常时)信息。当本地测控系统收到 NAK 信息后,本地测控系统将向指定的连接重新发送上次的数据。系统数据的变更可能有多种情况,各种情况下系统数据的传播方式有所差别:

#### i) 本地测控系统拥有控制权

在启动某个试验时,本地测控系统将向 PLC 发出启动试验的控制命令,同时根据试验的不同,开始试验启动阶段的各项初始化和数据准备工作。本地测控系统通过网络向所有的远程监测终端发出与当前试验相关的信息,同时向所有数据终端发出与当前试验数据显示方式相关的模板数据。

在试验进行过程中,本地测试系统通过硬件接口电路或通信回路采集测试过程中的各种数据和状态信息,在经过必要的数据处理后将测试系统数据或状态信息向所有的数据终端发送,所以所有远程终端能够观测到与本地测控系统完全一致的界面。

在测试过程中的所有测试参数的修改,数据处理方式的变更都是由操作人员在本地测试系统上完成并向全系统广播的。

#### ii) 远程终端拥有控制权

在远程终端拥有控制权的情况下,本地测控系统只拥有紧急情况下的控制权。在一般情况下,本地测控系统不能直接启动或停止试验,改变试验数据或修改显示界面。

当操作人员通过远程监测终端启动、停止试验或修改试验数据的显示方式时,远程监测终端将控制信息传送给本地测控系统,本地测控系统根据预先定义的通信协议的要求对接收到的信息进行校验、分析和处理。一方面本地测控系统根据控制命令的要求执行相关的控制要求,如启动、停止试验等,同时将远程监测终端发送的与界面显示相关的数据向所有其他的远程监测终端广播。

试验过程中的试验数据和试验状态的信息仍然是由本地测控系统通过硬件或通信接口采集和处理得到的;试验的数据和状态信息由本地测控系统向网络内所有已经连接远程终端以广播方式发送。

### 3) 独立请求数据与响应

在测试系统的通信机制的设计与实现过程中,有一种特殊情况应当要考虑。由于所有的远程终端加入测试网络的时刻是任意的,也就有可能在试验正在进行过程中的某一时刻有新的远程终端加入到网络中,由于测试网络的通信是基于广播方式传播的,而新加入的远程终端不可能接收到加入时刻之前的广播信息。在这种情况下,新加入的远程终端无法正确地理解和显示测试信息。

为了处理上述问题,在通信机制内引入了独立数据请求的机制;这种机制的核



心有两点，即广播信息缓存和批量数据更新：

i) 在本地测控系统内建立系统广播信息的缓存空间，该空间在试验开始阶段自动清空。在试验启动后将所有广播信息在缓存空间内保存一个备份。

ii) 在试验进行过程中，如果有新的远程终端加入，本地测控系统将当前时刻在数据缓存空间内的全部广播信息一次性传送给新的远程终端。此后新加入的新的远程终端与其他远程终端同步更新显示界面。

## 5 测控系统软硬件实现

**【摘要】**对分布式测试系统的本地及远程测控软件进行统一设计,实现了软件复用,并完成了软件的模块化开发。设计了伺服阀放大板的通用输出接口电路,并在电气系统中设计了有效的抗干扰措施。本章从软硬件两方面完成了测控系统设计与实现。

**【关键词】**测控软件 通用输出接口 抗干扰

### 5.1 测控软件功能设计及实现

#### 5.1.1 测控软件功能定义

电液伺服阀是结合了机械、电子和液压技术的高度精密部件,电液伺服系统综合了电和液压两方面的特点,具有控制精度高、响应速度快、信号处理灵活、输出功率大和结构紧凑等优点,在军事上和工业控制领域得到了广泛的应用。电液伺服阀是电液伺服系统的核心,在电液控制系统中,将电气部分和液压部分连接起来,实现电液信号的转换和放大,它的性能直接影响甚至决定整个系统的性能。由于电液伺服阀的高度精密性和在电液伺服控制系统中的关键地位,伺服阀的检测对于保证伺服阀的性能指标、保证电液伺服系统准确快速稳定的工作有重要的意义。

基于电液伺服阀的重要性,建立的电液伺服阀综合测试平台必须能准确、高速、有效地测量电液伺服阀的各项性能,为用户判断电液伺服阀性能提供图形化、高精度的依据。在实际测试过程中,数据采集和控制输出任务周期性地数据采集并更新到实时数据库中,将库中的数据按照相应的算法算得出结果并及时输出给通道。有的系统也可以是网络通讯任务代替过程数据采集和控制输出任务的功能,即通过网络和串/并行通信方式收集数据并存放在实时数据库中,实时数据库管理任务负责管理实时数据,并提供其他任务访问的接口。其他任务从实时数据库中读取数据完成各自的功能。如图形任务显示用户选定的图形页面,并不断从实时数据库中读取数据进行动态数据更新;历史记录不断地从实时数据库中读取所需的数据,按要求整理成磁盘文件,并提供查询、显示、打印、传送的接口;报表任务从实时数据库和历史激励中选取所得的数据,并按要求统计、归纳,并整理成文件储存;控制计算任务完成周期性的运算,运算数据的来源与结果都保存在实时数据库中,在实际的应用系统中,由于功能扩展需求,还具有一些其他的任务功能。

在电液控制系统中,按照以上的任务要求,总结常规系统及用户要求,结合实际的试验系统要求——本试验平台具有能对多种类型液压伺服阀性能进行测试、本地监测及远程监测的功能,拟定该系统具有的基本功能包括以下七个方面。

**本地通信功能：**该功能是本地测试网络与远程测试网络的核心部分。本地测试网络负责工控机与 PLC 间的通信，传输试验数据及命令，充分发挥工控机强大的数据处理及分析的能力，及下位机 PLC 安全可靠、控制稳定的特点；远程测试网络负责本地测试系统与远程测试系统间的数据通信，本地测试系统获取的试验数据要及时、准确地传送给远程测试系统，而远程测试系统对试验台的控制也须经过远程测试网络传给本地测试系统。为了实现分布式控制及充分发挥工控机与 PLC 的优点，则必须在三者间建立高速、可靠的连接，因此通信模块在整个测控系统中起着十分重要的作用。

**远程通信功能：**通过远程通信，可以将联网的远程监控系统与本地测控系统连接起来，实现对液压测试平台的远距离监控，同时可以有效地改善试验人员的工作环境，提高试验设备的利用率，实现试验数据大范围内的共享。

**数据采集：**数据采集是指将温度、压力、流量、位移等模拟量采集、转换成数字量后，再由计算机进行存储、处理、显示或打印的过程。下位机 PLC 只能采集低速数据，上传给工控机，高速数据则须由高速数据采集卡采集后直接传给工控机。该功能实现上位机与数据采集卡之间的联系，将数据采集卡的数据传送到数据库中，为试验过程中数据处理等提供原始数据。

**元件管理：**该功能实现对试验系统用到的所有元件进行有效管理，方便试验者对被测试的液压元件进行分类管理，以便方便地查询元件的试验记录和元件参数。

**过程控制：**不同的试验，所需的试验设备、试验油路各不相同，要实现不同试验间的切换，则需通过过程控制模块对液压试验平台上的各个电气元件进行控制，从而实现液压试验的自动化。PC 机或触摸屏将控制命令发出后，通过 PLC 实现对试验过程的控制。

**数据处理：**该功能实现对 PLC 上传的低速数据及采集卡采集到的高速数据的运算处理，并以曲线或数值的形式实时地、直观地显示在界面上，方便试验人员做出相关判断。

**数据管理：**实现对试验结果数据的管理。对应每一个试验数据生成一个数据文件，保存在系统中，当需要复现试验数据时，也可以方便地从保存的数据文件中读取数据。

### 5.1.2 测控软件的实现

本文研究的分布式测控系统是本地测控系统与远程测控系统的集成测控系统，远程监测系统与本地测控系统分别位于两地，打破了地域的界限。从功能角度分析，本地测控系统与远程监测系统所实现的用户功能基本相同，具有如下基本功能：控制试验平台（启动、停止等），试验数据实时显示，试验环境自配置，数据保存与复现、打印及预览，EXCEL 数据导出等。基于此为减少应用系统软件的开发工作量，本文提出了一种本地测控软件与远程监测软件在结构上完全统一的设计方案，其系统框架如图 5.1 所示。图中，本地测控系统与远程测控系统的功能结构基本相同，差别仅在于主控系统与外设

的数据交换方式。本地测控系统实时数据库通过 RS-232 与 PLC 交互或直接通过数据卡驱动程序采集或输出信号，远程监测系统实时数据库数据的更新仅能通过 TCP/IP 远程通信与本地测控系统交互实现。

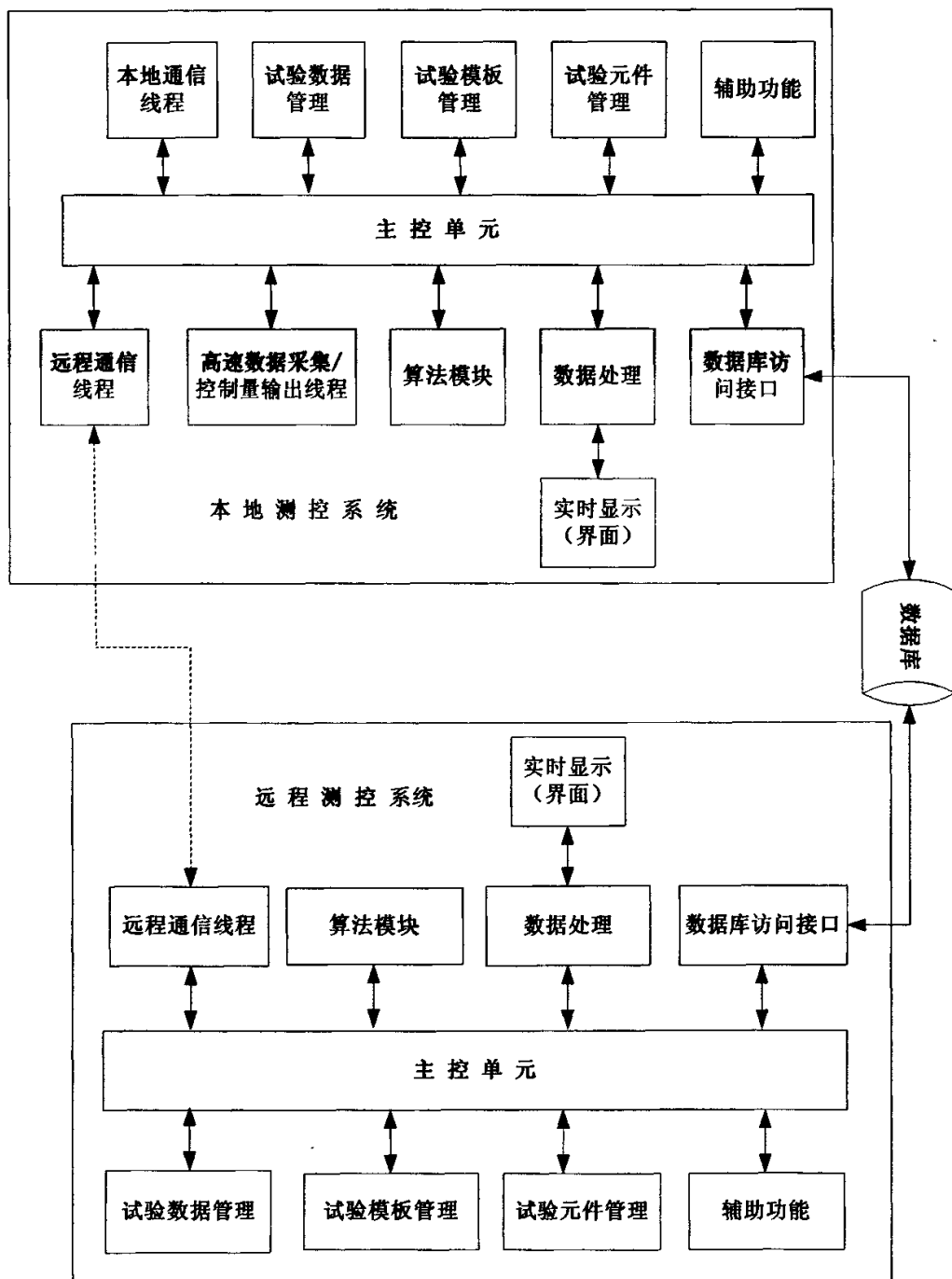


图 5.1 测控软件整体结构图

测控软件整体框架结构中,各功能块代表某一特定的功能要求,具有一定的独立性,与其他功能块的接口简单,因此可以基于测控软件的整体结构,采用模块化的编程方法,实现各功能模块。远程监测系统与本地测控系统功能上的一致,结构设计上的统一,使得编程效率得到了极大提高<sup>[66]</sup>,而模块化的设计方法提高了软件的可扩展性和可读性。研发的测控软件主界面如图 5.2 所示。

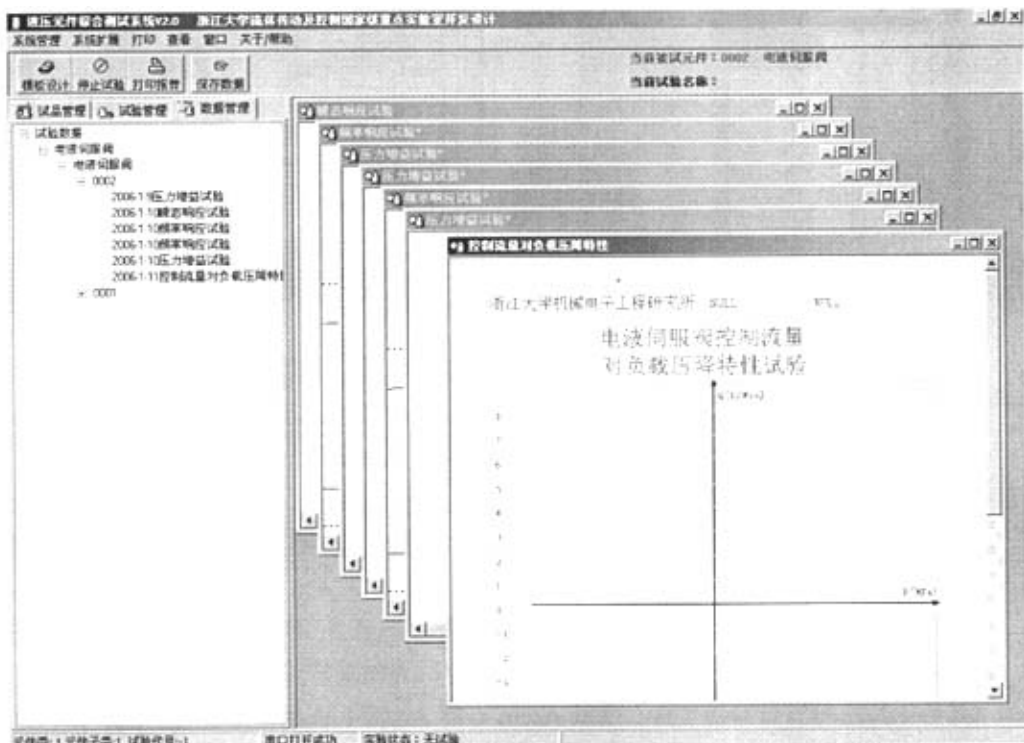


图 5.2 测控软件主界面

在实际开发的软件系统中,还提供了功能强大的用户可配置试验环境(如图 5.3 所示)。在该环境中试验数据显示和测试报告的主要构成元素被分为 5 中基本元素:固定文本、可变文本、系统变量、X-Y 二维图形和伯德图。以这几种基本的元素为基础,使用者可以非常方便地配置试验数据的显示格式和试验报告的输出格式。用户可配置试验环境将显示的数据元素抽象为各种变量,保存标准格式的数据库文件中,实现了试验数据与数据的表现形式完全分离。用户因此可以实现个性化的界面显示形式,而不拘泥于固定的数据内容项。可配置试验环境所见即所得的数据显示配置方案为实际测试过程提供了灵活多样的数据表示形式。为网络内所有监测接点的数据显示提供了一种规范的数据界面定义标准。

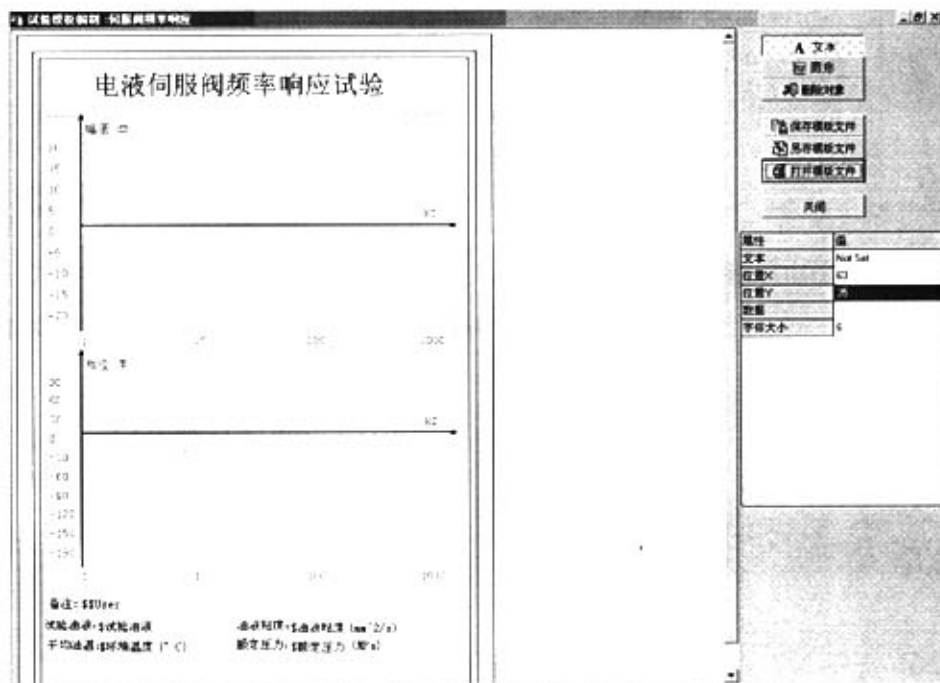


图 5.3 用户可配置试验环境

## 5.2 测控系统通用输出接口设计

伺服阀放大板的控制接口信号有多种形式，比较常见的有电压接口信号和电流接口信号两种，电压控制信号比较常见的有 $\pm 5V$ ， $\pm 10V$ ， $\pm 12V$ ， $0-5V$ ， $0-10V$ ， $0-12V$ 等各种形式；常见的电流控制信号有 $4-20mA$ 和 $0-20mA$ 两种。为了保证设计的测试平台具有一定的通用性，测试平台的输出控制信号必须能与各种常见形式的伺服阀放大板匹配。为此，应当设计硬件接口电路将测试平台标准输出的 $0-5V$ 电压信号转变为可能的各种信号形式。本节将对测控系统输出信号变换的硬件实现进行研究。

### 5.2.1 电压-电压变换

如图 5.4 所示的电路可以将输入的 $0-5V$ 电压转换为各种比较常见的电压形式。设输入信号为 $V_m$ ，电阻 $R_6$ 的分压为 $V_{ref}$ ；根据“虚短”的概念运放同相端的电压 $V_{a+}$ 与反向端的电压 $V_{a-}$ 相等，即：

$$V_{a+} = V_{a-} = V_m \quad (5.1)$$

根据“虚断”的概念，流过电阻 $R_7$ 和 $R_2$ 的电流应当相等，即：

$$\frac{V_{out} - V_m}{R_7} = \frac{V_m - V_{ref}}{R_2} \quad (5.2)$$

整理得：

$$V_{out} = \left(\frac{R_7}{R_2} + 1\right)V_m - \frac{R_7}{R_2}V_{ref}$$

可以看出，在电阻 R2 固定的条件下，调节电阻 R7 可以调节输出电压的变化范围，调节 R6 的分压  $V_{ref}$  可以调节输出电压的偏移量。

例如，输出电压要求为  $\pm 10V$  时，则取：

$$\frac{R_7}{R_2} = \frac{10 - (-10)}{5} = 4, \text{ 即 } R_7 = 4R_2$$

$$\frac{R_7}{R_2}V_{ref} = 10, \text{ 即 } V_{ref} = 10 \frac{R_2}{R_7} = 0.25$$

又如，输出电压要求为 1~5V 时，则取：

$$\frac{R_7}{R_2} = \frac{5 - 1}{5} = 0.8, \text{ 即 } R_7 = 0.8R_2$$

$$\frac{R_7}{R_2}V_{ref} = -1, \text{ 即 } V_{ref} = -1 * \frac{R_2}{R_7} = -1.25$$

图 5.4 中运放 A2 为跟随器，可以增加输出端带负载的能力。

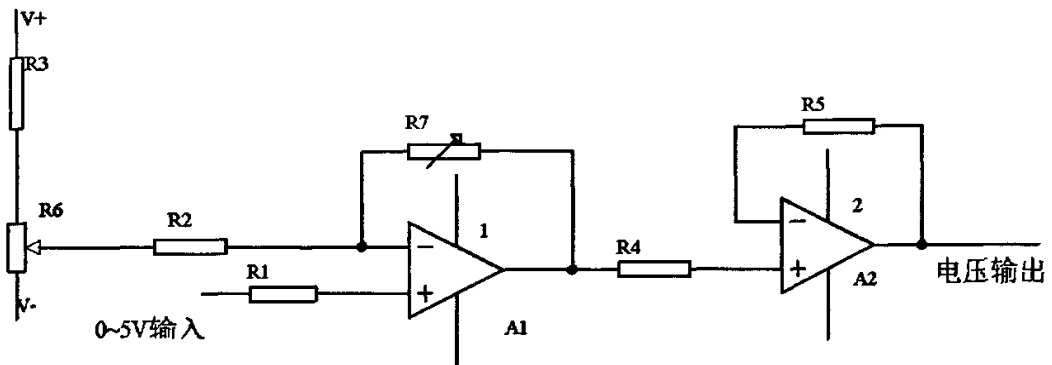


图 5.4 0~5v 电压到任意控制电压的变换

### 5.2.2 电压-电流变换

输出电压 0~5v 到 0~20mA 电流的变换电路如图 5.5 所示。根据“虚短”的概念，运放 A1 的同相端与反向端的电位相等，即：

$$V_+ = V_- \quad (5.3)$$

当电路中有  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  时, 下述关系成立:

$$\begin{cases} V_m - V_- = V_- - V_a \\ V_b - V_+ = V_+ \end{cases} \quad (5.4)$$

考虑到  $V_+ = V_-$ , 从上式可得电阻 R8 两端的电压为:

$$V_{ab} = V_b - V_a = V_m \quad (5.5)$$

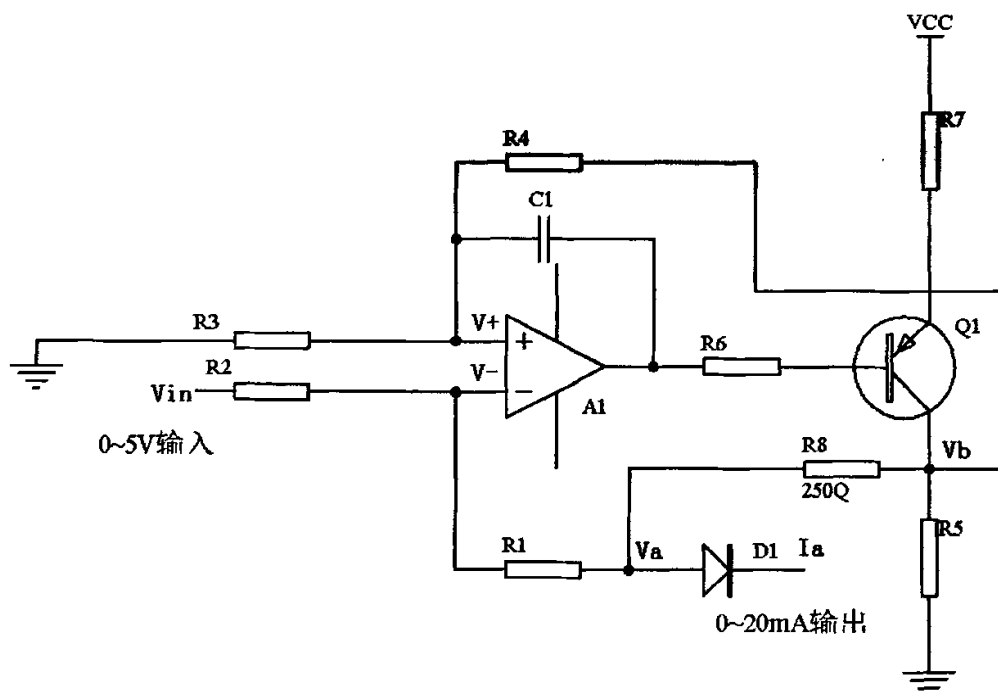


图 5.5 0~5v 电压到 0~20mA 电流的变换

流过电阻的电流为  $I_a = V_m / 250$ , 当输入电压在 0~5V 间变化时, 输出电流在 0~20mA 变化, 由于 R1 的阻值可以取得很大而输出负载小于 1k, R1 的分流作用基本可以忽略不计。



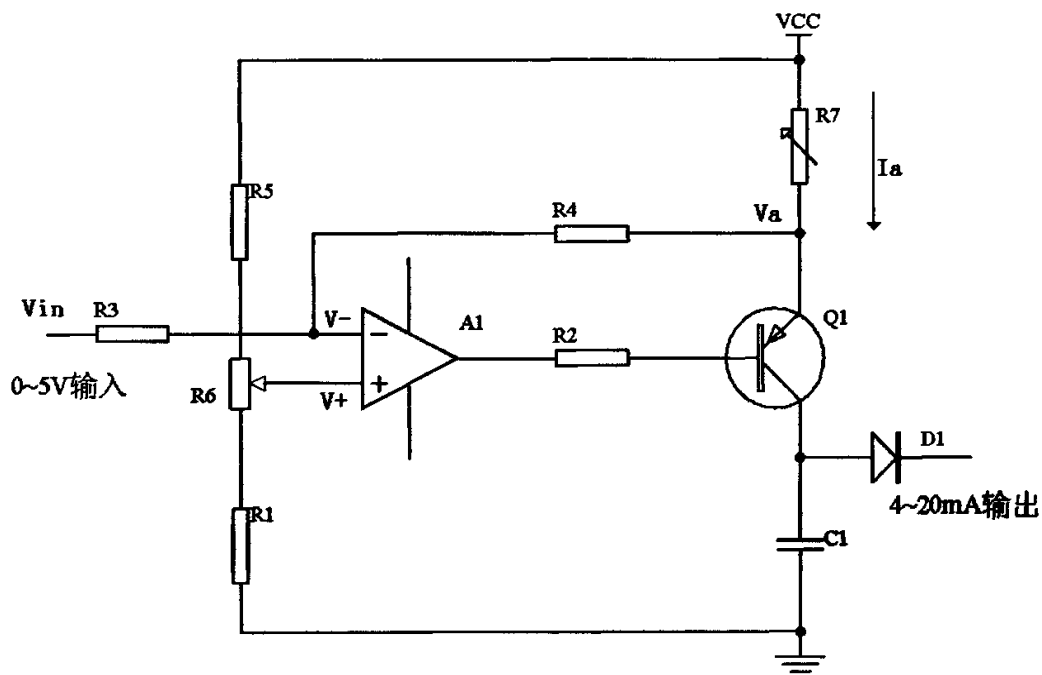


图 5.6 0~5v 电压到 4~20mA 电流的变换

输出电压 0~5v 到 4~20mA 电流的变换电路如图 5.6 所示。根据“虚短”的概念，运放 A1 的同相端与反向端的电位相等，即：

$$V_+ = V_- \quad (5.6)$$

图中输入电压  $V_m$ ，输出电压  $V_o$  和运放同相端电压满足如下关系：

$$\frac{V_m - V_-}{R_3} = \frac{V_- - V_o}{R_4} \quad (5.7)$$

整理得：

$$V_o = \left(1 - \frac{R_4}{R_3}\right)V_- + \frac{R_4}{R_3}V_m = \left(1 - \frac{R_4}{R_3}\right)V_+ + \frac{R_4}{R_3}V_m$$

输出电流  $I_a$  为：

$$I_a = \frac{V_o}{R_7} = \left(\frac{1}{R_7} - \frac{R_4}{R_3 R_7}\right)V_+ + \frac{R_4}{R_3 R_7}V_m \quad (5.8)$$

输出电流  $I_a$  与流过二极管的电流基本相等，设可调电阻 R7 和电阻分压  $V_+$  满足如下方程：

$$\begin{cases} \frac{5R_4}{R_3R_7} = (20-4) * 0.001 \\ \left(\frac{1}{R_7} - \frac{R_4}{R_3R_7}\right)V_+ = 4 * 0.001 \end{cases} \quad (5.9)$$

即

$$\begin{cases} R_7 = \frac{5R_4}{0.016R_3} \\ V_+ = 250 * \left(\frac{1}{R_7} - \frac{R_4}{R_3R_7}\right) \end{cases}$$

例如, 取  $R_3 = 150k\Omega$ ,  $R_4 = 40k\Omega$  可得:

$$\begin{cases} R_7 = 65.2\Omega \\ V_+ = 3.2V \end{cases}$$

可以满足输入电压 0-5V 到输出电流 4-20mA 的变换, 在推导过程中忽略了三极管射极电流比集电极电流  $I_o$  的细微差别, 通过微调电阻  $R_7$  可以实现电压电流的精确变换。

### 5.3 电气系统抗干扰设计

在测试现场, 由于被控对象和被测信号分布在不同的地方, 计算机与它们之间也有相当长的距离; 另外现场有强电设备, 它们的启动与工作过程对电子电路产生强烈的干扰。如电动机和其它电气设备产生的磁场及各种电磁波辐射等, 这些电磁场的存在和变化, 使测试系统出现电干扰, 信号线与控制线传递的信号失真, 如果这些干扰的影响不能被消除, 会大大降低数据采集的准确性, 所以必须采取一定的抗干扰措施<sup>[67]-[69]</sup>。

#### i) 采用强-弱分离方案

在大型的电气工程系统中, 最大的干扰源通常来自强电系统, 所以本系统的电气设备布线设计过程中, 严格按照强-弱分离的原则, 将电气系统分别放在强电配电柜、变频器柜、弱电控制柜中。在空间上, 强电配电柜、变频器柜与弱电控制柜离得很远, 减少避免空间的电磁干扰; 在供电设计中, 强电和弱电的供电采用不同的线路, 避免供电干扰; 强电和弱电的电源线分开线槽布线, 弱电的电源线和信号线也分开线槽布线。

#### ii) 采用模-数分离方案

经验表明, 一般模数混合系统中, 数字部分的干扰量比较大, 而且随着频率的增加而增加, 会对模拟部分产生影响。在本系统中, 将弱电的模拟部分与数字部分全部分离, 采用双电源分别供电, 分别接地, 使数字部分对模拟部分的干扰减到最小。

#### iii) 多重屏蔽方案

在系统的分布线过程中, 强电柜和变频器柜采用屏蔽接地, 以减少对外的电磁辐射;

弱电控制柜也采用电磁屏蔽措施，减少来自外部的干扰；信号传输线全部采用带屏蔽的电缆线，并且屏蔽层全部在弱电控制柜单点接地，最大限度地降低外界的电磁干扰。

#### iv) 浮空接地方案

在本试验台的电路系统中，把数字电子装置和模拟电子装置的工作基准地浮空。浮空可使微机系统不受大地电流影响，提高了系统的抗干扰性能，由于强电设备都采用接地保护，浮空技术切断了强电与弱电的联系，系统运行安全可靠。微机系统外壳采用屏蔽接地，可防止静电干扰、电磁感应干扰，同时对人体安全。当然浮空的有效性取决于实际的悬空程度。因为系统存在较大的对地分布电容时，很难实现并保证真正的浮空。

#### v) 隔离及滤波方案

采用光电耦合器件来隔离开关量的输入输出与微机系统电气上的联系，只保持信号上的联系。光电耦合器件是以光为媒介进行间接耦合，具有较高的电气隔离和抗干扰能力。采用继电器实现 5V 与 24V 隔离，强电和弱电的隔离。继电器的线圈和触点之间没有电气上的联系，因此可利用继电器的线圈接受电气信号，利用触点发送和输出信号，从而避免了强电和弱电之间的直接接触，实现了抗干扰隔离。采用滤波方式可以有效减少模拟量中杂波、尖峰和其他高频干扰量对信号的影响。

#### vi) 多级保护方案

系统设置总的断路器，每个强电模块如电机、变频器都有自己的保护装置和热继电器，弱电控制柜设置空气开关；所有机壳都接到保护地电级上；并在弱电控制柜设置总的急停开关，如发生故障可快速关断整个系统。

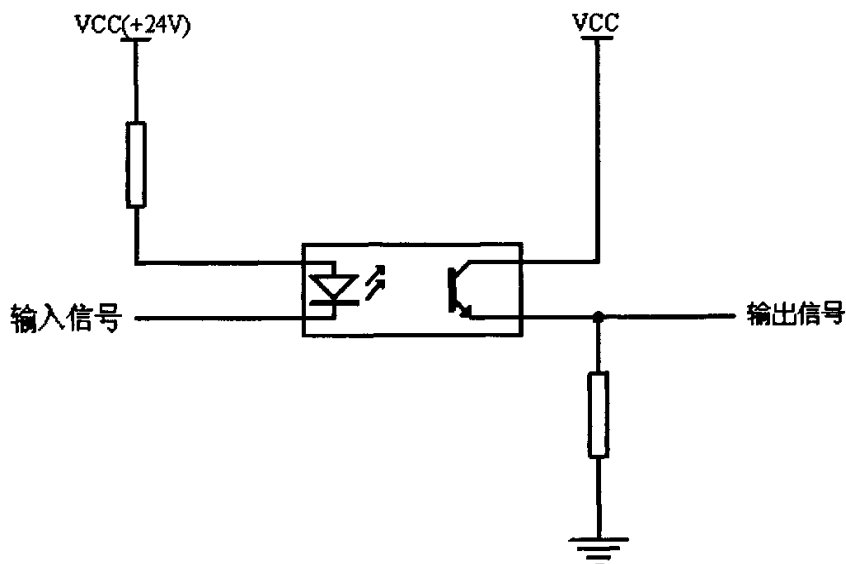


图 5.7 光电耦合器的方式

系统中有多路的光电接近开关及压差继电器，这些信号涉及到系统保护，每一路都至关重要，信号都为 24V 开关量，而工控机数据采集卡能接受的信号为 0-5V，所以要

经过电平转换，这里采用了常用的光电耦合器的方式，如图 5.7 所示，通过调配光耦的输入输出端的匹配电阻，可以将 24V 的信号转换为 5V 的信号，并且可以实现输入信号的隔离，能起到系统保护和抗干扰的效果。

系统中有电磁溢流阀、电磁方向阀等多路开关量控制单元，其供电电压均为 24V，供电电流 1A 以上，并且电磁阀线圈在开关瞬间会产生很大反电势，对供电器件造成破坏。工控机控制卡的输出电压为 5V，输出电流最大 200mA，并且抗干扰能力较差，所以要经过电压、电流的放大及隔离，这里采用了继电器隔离的方式，如图 5.8 所示，控制卡的输出信号用来控制继电器的动作，通过继电器来控制 24V 的供电信号，这样既可以实现用工控机控制卡的小信号控制电磁阀的大信号，又可以实现强—弱电的隔离。

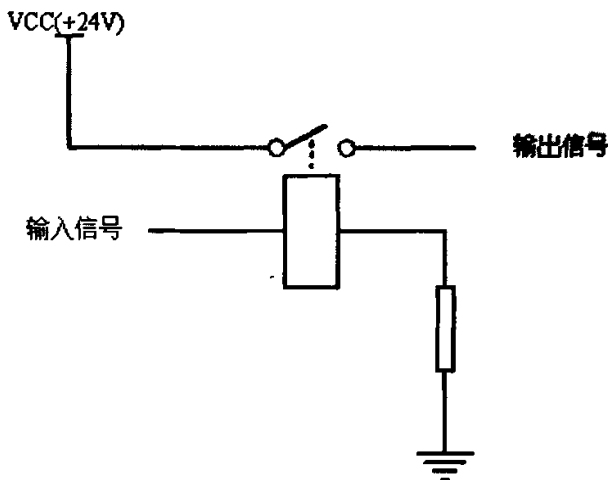


图 5.8 继电器隔离的方式

试验台中安装又多路不同的传感器，如流量、压力、温度、转矩、转速等，这些传感器大部分都采用 24V 供电和 4-20mA 的模拟信号输出，而工控机采集卡要求的输入信号为电压信号，所以要在回路中串电阻将电流信号转变为电压信号，如图 5.9 所示，串入了 250 欧的电阻，将 4-20mA 的电流转换为 1-5V 电压信号，为了减少强电部分对弱电的干扰，在输入部分增加了 R-C 低通滤波器，截止频率设定为 1000Hz。

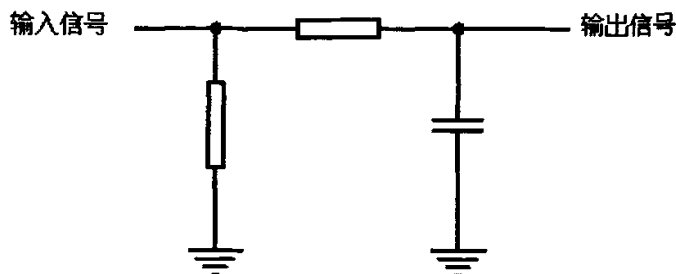


图 5-9 电流转换电路

## 6 电液伺服阀典型性能测试

**【摘要】**在所研发的电液伺服阀测试系统上,对电液伺服阀的两个典型性能进行了测试,验证了测试系统的功能完整性和可靠性。

**【关键词】**硬件平台 试验研究

### 6.1 电液伺服阀测试系统硬件平台

本课题严格按照国家标准规定的试验条件及测试内容搭建液压试验平台,综合分析各项试验的试验内容,输入输出信号,以及电液伺服阀的性能测试方法,在此基础上设计了一套以 PC、PLC 及数据卡为硬件基础的、高度自动化的、具有远程监测功能的电液伺服阀分布式测试系统。该系统以三菱 Q06 系列 PLC 主控单元为核心,配合使用各种功能模块、人机对话界面—触摸屏、传感器和执行元件组成相对独立工作单元,管理整个控制及测试系统和低速数据采集,完成对试验台系统的检测、控制和程序运行,根据检测到的系统工作状态和控制指令,经数模转换输出控制信息,通过功率放大器输出,控制执行机构按要求工作。通过 A985GOT-TBA 型触摸屏图形终端向主控单元输入工作指令和工作参数,并及时输出、显示系统工作状态和实验数据。以研华 IPC-610 型工控机为上位机,利用 C++ Builder 开发了一套计算机系统软件,本地通信模块接收 PLC 上传的低速数据,并以数据采集模块驱动研华 PCI-1716 采集卡采集高速数据,数据处理模块对数据处理后,下传控制命令给 PLC 或直接通过研华 PCI-1721 卡输出控制信号,配合 PLC 及触摸屏,实现试验的自动化操作,试验结果数字化显示、保存、输出、以及整个网络系统共享等功能。



图 6.1 测试控制台

如图 6.1 所示为本地测试控制台的整体结构，右上方为触摸屏图形终端，综合了输入和输出的两大功能，可以用指触方式向 PLC 主机输入各种数值数据和开关量控制指令，同时具备屏幕显示功能，直接显示系统的工作状态数据、图形、曲线等内容；右下方一些常用按钮、开关，通过选择“程控”或“本地”，决定由 PLC 或按钮控制试验台；左边为本地测控系统的人机界面，通过界面进行人机交互，访问试验平台。

图 6.2 为电液伺服阀综合测试系统的电控部分，连接液压试验平台与控制平台，实现信号的采集与输出、对无载液压缸的 PID 硬件纠偏、电液伺服阀激励信号的合成、信号转换等。

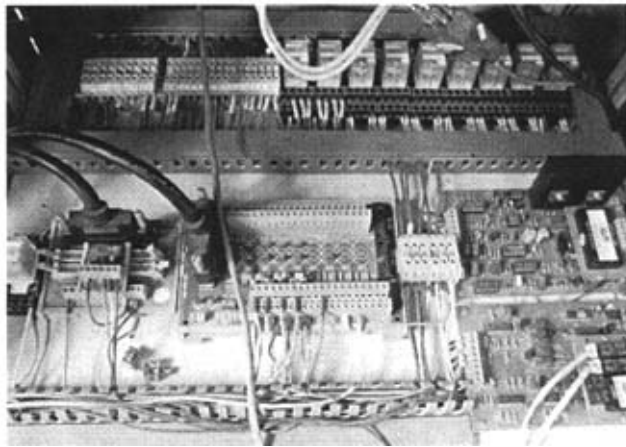


图 6.2 控制台内视图

图 6.3 中靠近读者方向为电液伺服阀动态性能测试平台，远离读者方向为电液伺服阀静态性能测试平台。

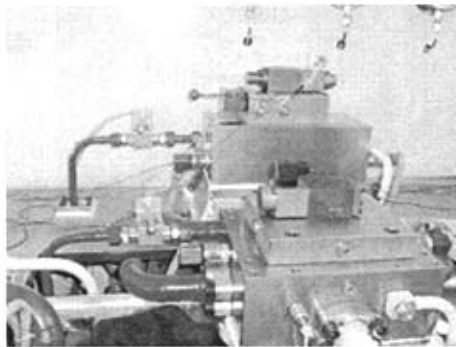


图 6.3 电液伺服阀动/静态性能测试台

## 6.2 空载控制流量对输入电流特性试验

### 1) 标准试验方法

- i) 打开回油口截止阀;
- ii) 打开两控制油口截止阀, 关闭内泄漏截止阀;
- iii) 调节伺服阀供油压力为额定压力;
- iv) 缓慢地输入电流, 循环若干次;
- v) 接好  $X$ - $Y$  记录仪,  $Y$  轴为控制流量,  $X$  轴为输入电流, 并检查两个坐标的零点和选择合适的比例标尺。
- vi) 调节自动信号发生器, 使输入电流最大值为正负额定电流  $\pm I_n$ ;
- vii) 令输入电流周期性循环, 保证记录笔运动灵活, 并以记录仪和流量计的动态效应可忽略不计的速度运动;
- viii) 在整个电流循环内应保持伺服阀压降基本恒定;

### 2) 试验流程

- i) 在试验管理页面中双击“空载控制流量对输入电流特性试验”, 系统弹出试验参数设置对话框。如图 6.4 所示;
- ii) 按试验要求设置试验参数, 点击“确定”, 弹出“空载控制流量对输入电流特性试验”模板, 试验正式启动;
- iii) 试验完成后, 点击“停止试验”按钮, 试验停止。

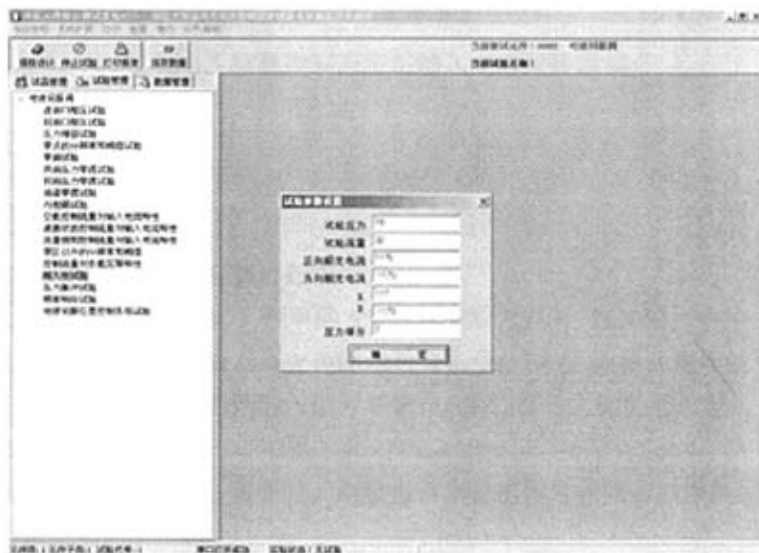


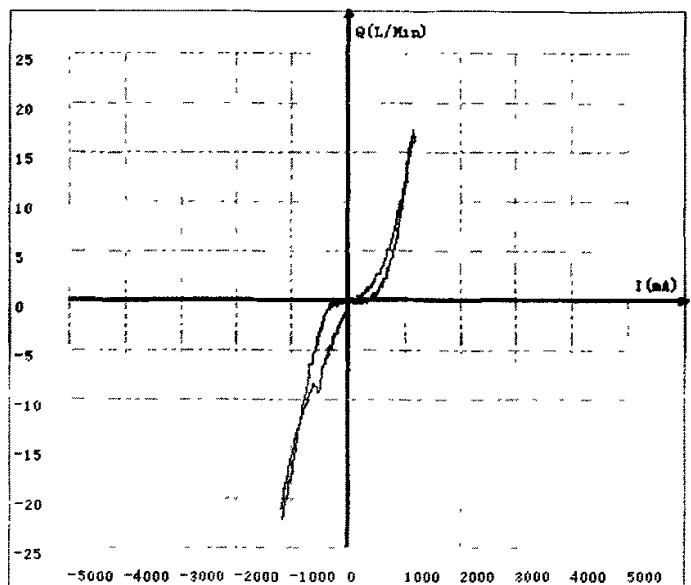
图 6.4 试验参数设置对话框

### 3) 试验结果

电液伺服阀空载控制流量对输入电流特性曲线如图 6.5 所示, 试验曲线在试验进行

中逐点绘制完成, 试验完成, 试验曲线绘制完成, 并计算线性度、滞环、对称性、流量增益等参数, 并将计算结果显示在试验模板对应位置上。

电液伺服阀空载控制流量  
对输入电流特性试验



额定电流时流量: 18.635 L/Min  
 线性度: 33.4% 滞环: 368.205 mA  
 对称性: 22.33% 流量增益: 0.016 (L/Min)/mA

图 6.5 空载控制流量对输入电流特性曲线

### 6.3 频率特性试验

#### 1) 标准试验方法

- i) 调整液压缸, 使活塞接近行程中点;
- ii) 以 5Hz, 或相位移  $90^\circ$  频率的 5% (两者取低者), 施加输入信号;
- iii) 记录此频率及在示波器或在传递函数分析仪(TFA)上测得的速度信号振幅;
- iv) 在示波器上测量伺服阀输入信号和输出(速度)信号之间的相位差;
- v) 记录此数值;
- vi) 提高输入信号频率, 需要时, 调整振荡器输出信号振幅, 以保持伺服阀输入的电流量值为恒定值;
- vii) 记录新的频率、振幅值和相位移值;
- viii) 计算该频率下振幅值对最初频率下振幅值之比;
- ix) 将该比值转换为分贝值;



x) 根据需要在足以覆盖 15dB 的衰减和包括对应于  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  及更大相位移频率的频率范围内测量振幅和相位移;

xi) 计算对应的振幅比数值。

## 2) 试验流程

i) 在试验管理页面中双击“频率响应试验”，系统弹出试验参数设置对话框;

ii) 按试验要求设置试验参数，点击“确定”，系统再次提示是否开始试验。选择“是”后，系统启动试验程序。收到 PLC 完成系统调节的通知信息后显示“伺服阀扫频试验”界面，如图 6.6 所示;

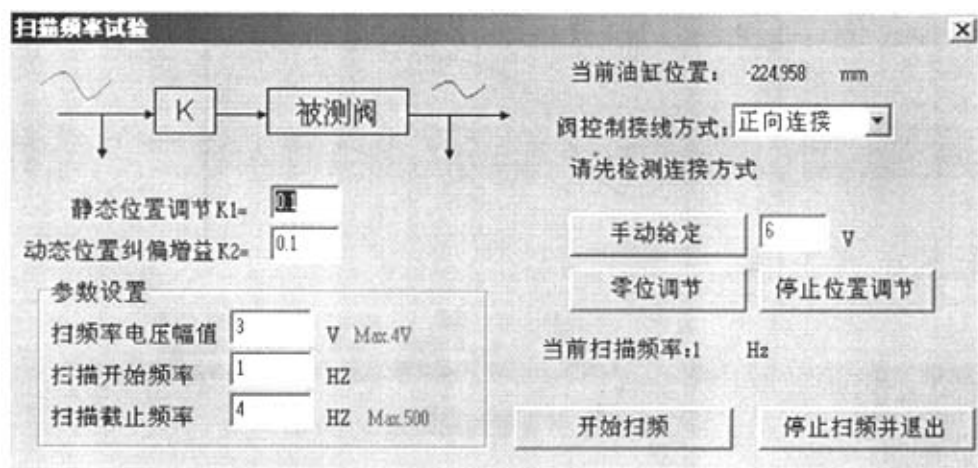


图 6.6 扫频控制用户界面

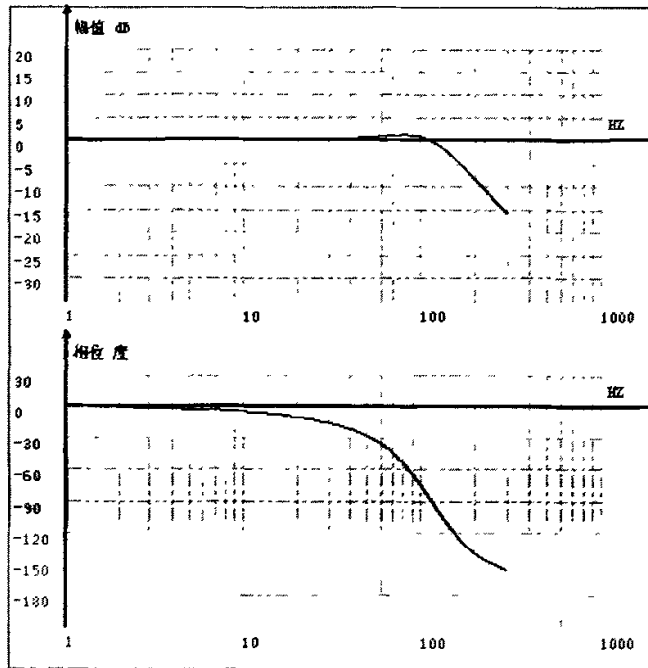
iii) 在图 6.6 中，完成设置试验参数后点“开始扫频”按钮，系统开始进入扫频程序。扫频完成后系统会自动关闭扫频界面，开始对数据进行集中处理和绘图;

iv) 试验完成后，点击“停止试验”按钮，试验停止。

## 3) 试验结果

电液伺服阀频率特性曲线如图 6.7 所示，上方曲线为电液伺服阀幅频特性曲线，下方曲线为相频特性曲线。试验环境及试验压力、频宽等参数以文本形式显示在试验模板中。

## 电液伺服阀频率响应试验



备注: 扫频测试范围0~300HZ 频宽: 138 HZ  
 试验油液: 10#航空液压油 油液粘度: 19 (mm<sup>2</sup>/s)  
 平均油温: 20 (°C) 额定压力: 10 (MPa)

图 6.7 电液伺服阀频率特性曲线

## 7 总结与展望

电液伺服阀是机电液一体化系统中连接电子技术和液压技术的重要接口元件,其特性对系统性能产生重大的影响,对其进行定期维护和性能检测尤为重要。本课题在分析测试系统功能、电液伺服阀特性及常规测控方案的基础上,设计了具有远程监测功能的电液伺服阀分布式测控方案,并对方案实现过程中的两大主要问题频率特性测试方法及分布式数据通信策略进行详细研究,提出了具体的解决方案。基于提出的解决方案及本地与远程测控软件统一设计的方法,以模块化的思想完成系统软件开发,并对相关硬件进行了设计。最后在所研发电液伺服阀测试系统上,对电液伺服阀的两个典型性能进行了测试,验证了测试系统的功能完整性和可靠性。开发的电液伺服阀分布式测试系统实现了电液伺服阀性能测试的全自动化,提高了测试的精度和速度,实现了在整个网络系统范围内共享试验平台和试验数据,使试验人员摆脱了地域的局限,改善了试验环境,降低了试验成本。

总结本课题,其研究的主要工作和成果如下:

1) 实现了电液伺服阀测试平台的远程监测功能。设计了采用以 PLC 为现场控制中心的、PC 机为数据处理单元的、触摸屏提供人机交互平台的分布式测控系统,开发了本地及远程测控软件,及完整的本地及远程通信解决方案,实现了远程异地用户对电液伺服阀测试过程的监测,改善了用户试验环境、降低了试验成本。

2) 设计了基于互相关原理的频率特性测试方案,实现伺服阀激励信号——正弦扫描信号与动态液压缸纠偏控制信号的软件合成,利用研华数据卡的“FIFO+中断”技术实现 Windows 高速实时数据的采集,针对动态液压缸位置定中系统的特点设计了单神经元自适应 PID 算法纠正动态液压缸活塞的运动中心位置,并设计了 FFT 及 IFFT 算法剔除干扰信号对频率特性测试的影响。

3) 提出了分布式测控系统通信解决方案,详细设计了本地串口 RS-232 通信及远程网络 TCP/IP 通信的数据帧结构、数据交互机制,以及远程用户控制权申请、分配、归还机制,解决了远程多用户对测试系统试验平台的控制权争用问题,并针对特殊数据请求设计了独立数据响应机制,保证了任何时刻加入网络系统的用户均能观看完整的试验过程信息。

4) 采用远程监测系统与本地测控系统统一设计的方法,设计测控系统软件结构,解决了软件复用问题,提高了软件开发效率;采用模块化的方法编写软件,提高了软件的可扩展性和可读性。

在本课题研究的基础上,可以开展以下四方面的工作:

1) 网络安全及延时。Internet 是一个开放的、无控制机构的网络,随着 Internet 应用普及,网络安全问题日益突出,为了防止交换的数据发生增加、修改、丢失和泄漏,

试验特权的盗取等，基于 Internet 的远程测控必须把网络安全问题放在重要的位置。同时网络延时也是困扰远程监控系统的一个重要问题，随着网络技术的不断发展，新一代网络安全协议的出现，以及高速交换路由技术将进一步提高监控数据在网络中传输的实时性，这类问题有待进一步的解决。

2) 引入高级算法。本文对多用户同时申请控制权的争端解决方案采用的是先到先服务的原则，此原则对远程客户控制权申请的优先级、网路延时对申请信息到达服务器时间的影响、客户端申请同一控制权的次数等因素的考虑欠缺，可以设计更高级的算法对用户分配控制权。

3) 加入视频技术。本系统对试验台的监控仅限于数据监测，无法实现远程客户对试验现场的观测，如果把视频监控与数据监测控制结合起来，效果更佳，但本文由于精力有限没有做深入探讨。

4) 开发新的测试平台。目前国内的伺服阀测试都要依赖独立的液压试验台，投资大、测试不够快捷方便。MOOG 公司 80 年代研制出了便携式伺服阀性能分析仪，体积小便于携带它摆脱了伺服阀测试对独立液压油源的依赖，利用伺服阀应用现场的油源就可以对伺服阀进行实地检测。而国内尚没有此类产品，开发伺服阀性能分析仪将有很大的应用价值。

## 参考文献

- [1] 傅周东. 液压元件稳动态特性计算机辅助测试系统研究开发. [浙江大学硕士学位论文], 1988年11月
- [2] 潘伟, 陈桂明, 王汉功. 虚拟仪器在液压测试技术中的应用. 机床与液压, 2001, (3):123-125
- [3] 方匡阳. “B级”精度液压阀计算机辅助测试系统. 工程机械, 1998(11)
- [4] 关浩, 于靖华. 基于VB的液压系统检测虚拟仪器控制面板设计. 液压与气动, 2004年第3期:26-28
- [5] 王益群, 王燕山, 姜万录. 液压CAT技术的发展现状与展望. 机床与液压, 2001年第2期:10-11
- [6] 高亚东, 傅周东. 基于虚拟仪器的液压元件通用测试系统. 液压与气动, 2003年第4期:35-37
- [7] 康荣学, 贾海波, 张优云. 基于Internet的远程实验研究. 计算机工程与应用, 2002(16):168-170
- [8] <http://www.ornl.gov/ORNLReview/rev30-12/text/csac.htm>
- [9] C C Ko, B M Chen, S Y Hu, V Ramakrishnan, C D Cheng, Y Zhuang and J Chen, A Web-based virtual laboratory on a frequency modulation experiment, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2001, 31(3):295-303
- [10] C C Ko, B M Chen, J Chen, Y Zhuang and K C Tan, Development of Web-based laboratory for control experiments on a coupled tank apparatus, IEEE Transactions on Education, 2001, 44(1):76-86
- [11] 丑武胜, 王田苗. 基于互联网的机器人远程实验系统. 高技术通讯, 2003(8):66-70
- [12] 蔡英文, 杨誉宗, 吕露, 胡钧, 李民乾, 孙洁林, 陈良尧. 基于因特网的STM远程实时控制系统的设计与实现. 计算机工程, 2003, 29(4):93-95
- [13] 桂任舟. 基于虚拟仪器技术和互相关原理的相位测量仪. 仪表技术与传感器, 2004年第5期:8-10
- [14] 朱云辉, 姜曼松. 基于虚拟仪器技术和互相关原理的流体流速测量仪. 仪器仪表用户, 2005年第12卷第3期:30-32
- [15] Hydraulic fluid power-Servoalves-Test methods, ISO 6404-1995(E)
- [16] William J. Thayer. Specification Standards for Electrohydraulic Flow Control Servovalves. MOOG Technical Bulletin 117, June 1962
- [17] DONALD J. HALL Computer Controlled Testing of Servovalves. MOOG Technical Bulletin 128, May 1976

- [18] 夏红. 液压阀 CAT 测试系统的探讨. 马钢职工大学学报, 2002 年 1 月第 12 卷第 1 期:4-7
- [19] 李文宏, 裘丽华, 王占林. 基于 VXI 总线的电液伺服阀动态特性测试系统. 同济大学学报, 2002 年第 30 卷第 10 期:1267-1270
- [20] 杜虎兵, 罗庚合. 基于 PLC 控制的液压试验台电气设计. 西安航空技术高等专科学校学报, 2006 年 9 月:12-14
- [21] 吕瑛, 李传日. 伺服阀性能测试系统的研制. 装备环境工程, 2005 年 10 月第 2 卷第 5 期:51-54
- [22] 王静, 谭建平. 基于促你仪器的液压 CAT 系统软件设计与应用. 机电一体化, 2004 年第 3 期:59-62
- [23] MITSUBISHI Q 系列 CPU 用户参考手册 (功能解说, 程序基础).
- [24] MITSUBISHI QCPU User's Manual (Hardware Design).
- [25] MITSUBISHI 可编程控制器-MELSEC-Q 系列大全 (新).
- [26] MITSUBISHI GX Developer Ver. 7/Simulator Ver. 6 操作手册.
- [27] 李建永, 姜生元, 韩宝琦. 液压综合试验台CAT系统的研究. 机电产品开发与创新, 2003, (3) :37-38
- [28] 马千里, 黄克强. 基于PC机的频率特性测试系统研究. 计算机测量与控制(自动化测试), 2005. 13(10):1027-1030
- [29] 汪首坤, 王军政, 马俊, 李金仓. 电液伺服阀动态性能测试技术的研究. 液压与气动, 2003年第6期:48-50
- [30] 易建钢, 陈奎生, 林瓚. 伺服油缸动态扫频问题研究. 湖北工学院学报, 2003年4月第18卷第2期:129-131
- [31] 叶齐鑫, 侯国屏, 赵伟. 虚拟仪器环境下的频率特性测试方法. 电测与仪表, 2005 年第6期总第42卷第474期:1-5
- [32] 易建钢, 湛从昌, 吴琼进. 电液伺服阀动态特性测试中复合数字滤波算法研究. 液压与气动, 2004年第2期:15-16
- [33] Advantech, Advantech device driver user manual V1. 5 for Windows[Z]. Advantech, 2001
- [34] Advantech.PCI-1716 user's manual [Z]. Advantech, 2001.
- [35] Advantech. PCI-1721 user's manual [Z]. Advantech, 2001.
- [36] 高庆, 谭业双, 石春和. C++ Builder 环境下数据采集系统的开发应用. 电脑开发与应用, 第14卷第6期:22-23
- [37] 茆美琴, 余世杰. 利用C++ Builder实现实时数据采集系统的数据库管理. 计算机应用, 2002年12月第22卷第12期:48-49
- [38] 曾良才, 陈新元, 李鹏. WINDOWS环境下伺服阀实时测控系统的高速数据采集研究.

- 液压气动与密封, 2002年4月第2期:26-27
- [39] 陈建国, 严德昆. Windows下高速数据采集系统软件设计. 微机算计信息(测控自动化), 2005年第21卷第10-1期:100-102
- [40] Yao Xiaoxian, Lin Fan Frequency Response Computation and Error Analyses [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1999, 8(4):381-385
- [41] National Instruments. Measurement Studio Reference [Z]. National Instrument, 2001
- [42] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真. 电子工业出版社. 2003(1)
- [43] 范云霄, 刘桦. 测试技术与信号处理. 中国计量出版社. 2003(2)
- [44] 杨永昌, 杨端, 王凯. 快速傅立叶变换算法及其实现技术. 邢台职业技术学院学报. 2006年6月第23卷第3期:36-38
- [45] 李春光, 艾春廷, 陈作炳, 何革群. 基于FFT和IFFT实信号处理方法研究. 武汉理工大学学报, 2001年7月第23卷第7期:39-43
- [46] 庄殿铮. 基于Internet的网络数控制造技术. 机床与液压, 2003. No. 4:182-184
- [47] Ewald H, Client-server and gateway systems for remote control in engineering education, Global Journal of Engineering Education 2003, 7(2):201-208
- [48] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability Analysis of Networked Control Systems. Proc American Control Conference. 1999:2876-2880.
- [49] Kyung Chang Lee, Suk Lee. Remote controller design of networked control system using genetic algrithm. ISIE, Pusan, KOREA, 2001:1845-1850
- [50] 张伟, 张平, 韩玉璞. 多节点互控型计算机分布式控制系统的设计. 计算机测量与控制, 2002. 10(4):239-241
- [51] 罗家融, 季振山, 熊斌. 网络通讯技术在分布式控制系统中的应用. 微机算计信息, 2000年第16卷第5期:12-14
- [52] 余建军, 杨家军. PC机与单片机多机通信方法在工程中的应用. 机床与液压, 2005. No. 12:138-139
- [53] 张允刚, 刘常春, 刘伟, 何付志. 基于Socket和多线程的远程监控系统. 控制工程, 2006年第13卷第2期:175-177
- [54] 蒋东兴. WindowsSockets网络程序设计大全[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [55] G. C. Walsh, O. Beldiman, L. Bushnell, Scheduling of Networked Control Systems, IEEE Control Systems Magazine, 2002:57-65
- [56] Paul O' Shea. Increase the Speed of Your PC-Based Test System. EE-Evaluation Engineering, 1997, 36(6) :39-46
- [57] James R Miller, The remote application controller, Computers&Graphics, 2003(27): 605-615
- [58] 王建新, 杨世凤, 史永江, 童官军. 远程监控技术的发展现状和趋势. 国外电子测

量技术, 2005年第4期(总第122期):9-12

- [59] 曹军义, 刘曙光. 基于Internet的远程测控技术[J]. 2001, 6:17-21
- [60] Nichols H. M. C., Bernard C. B. and David M.H.Remote Instrument Diagnosis on the Internet[J]. IEEE Intelligent System. 1998,(5):70-76
- [61] 马国华. 组态技术及其应用. 清华大学出版社, 2001
- [62] 段长明, 刘载文. 分布式异构系统中数据融合与存储的方法. 测控技术, 2005, 24(2):5-9
- [63] R. H. Walden. Analog-to-digital converter survey and analysis. IEEE Journal on Selected Areas in Communication 17(4), 1999, 4
- [64] ZIEJEW SKIM Mehta, GO ETTLER H. Fast Data Acquisition fou Internal Combustion Engine Laboratory[C]. Proc of the 1990 ASME Intern Computers in Engineering Conf, 1990:445-448
- [65] 李荣正, 沈行良, 华勇. 过程控制系统远程监控和管理. 上海工程技术大学学报, 2003年12月第17卷第4期:271-274
- [66] 李涛, 孟庆海, 李铁. 一种现场监控系统与远程监控系统统一设计的方法. 宇航计测技术, 2006年4月第26卷第2期:51-53
- [67] 罗雪莲. 分布式控制系统抗干扰设计. 低压电器, 2006. No. 12:53-57
- [68] 刘俐. 工业恶劣环境中单片机在数据采集中的抗干扰设计. 鞍山师范学院学报, 2006-08, 8(4):53-55
- [69] 庄森. 数据采集系统抗干扰设计. 设计与制造, 2005.No. 5:22-24



## 攻读硕士期间发表（录用）的学术论文

王庆丰，范文玲. 基于互相关原理的伺服阀频率特性测试系统研究. 中国机械工程（已录用）

## 致 谢

本论文是在我的导师王庆丰教授的悉心指导之下完成的，在设计过程中，自始至终凝聚着导师的心血。恩师治学严谨，学识渊博，思想深邃，视野雄阔，以及博大的胸怀，乐观豁达的心态为我营造了一种良好的精神氛围。使我不仅接受了全新的思想观念，树立了宏伟的学术目标，领会了基本的思考方式，掌握了通用的研究方法，而且还明白了许多待人接物与为人处世的道理。在此，再一次向两年来一直关心我、指导我的王老师致以深深的感谢。

在课题研究过程中得到了我的师兄唐建中，聂勇的指导和帮助，没有他们的帮助和支持，课题不可能如此快的进展，在此向他们表示我由衷的感谢。在此我还要感谢钟天宇、于慧君、肖清、闭治跃、王海波、付强、何蝶萍、胡楚雄、胡宝赞、林添良、谢华军等同门的大力支持，他们在课题的研究过程中，给了我很大的启发，开阔了本人的思路，并帮助本人做了许多工作，在此表示衷心的感谢。

感谢机电 05 硕士班的全体同学，特别要感谢黄志勇等班委为班级所做的一切努力，创建了一个团结、友爱的集体，对于能在这样集体里生活两年我感到十分快乐与自豪。还要感谢我的好友王晶晶以及在研究生会的朋友们，她们使我硕士的生活更加精彩。

最后，我要感谢我的父母，他们一直默默的支持、鼓励我，使我能安心完成学业，没有他们含辛茹苦的培养就没有今天的我，在这里我要祝他们身体永远健康。

范文玲

2007 年 5 月于求是园

# 电液伺服阀分布式测试系统研发

作者: [范文玲](#)

学位授予单位: [浙江大学机械与能源工程学院](#)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y1215577.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1215577.aspx)