

朱绎闻,陈湘萍.高液压小流量试验台设计[J].智能计算机与应用,2025,15(9):7-11. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.250902

# 高液压小流量试验台设计

朱绎闻,陈湘萍

(贵州大学电气工程学院,贵阳 550025)

**摘要:**液压技术自动化已经成为工业生产中不可或缺的一部分,且已成为工业发展的一种趋势。机电液一体化可实现液压系统的柔性化和智能化,充分发挥液压传动动力大、惯性小、响应快等优点。在大型飞机国产化的时代,其配套检测设备的国产化也成为了必要的需求。根据航天器舱门系统液压构件的性能需求,本文提供了一个高液压小流量测试平台的设计方案,基于PLC作为控制部分的处理器,基于LabVIEW设计上位机人机交互界面,对系统硬件及软件的设计方法进行了详细叙述,并对该实验台进行了实验验证。研究结果表明:整个试验台满足控制与驱动功能一体化设计且具备故障检测能力,在系统指令执行的过程中具备一定容错能力,确保可靠性和安全性。

**关键词:**液压;试验台;PLC;LabVIEW;机电液一体化

中图分类号:TP273 文献标志码:A 文章编号:2095-2163(2025)09-0007-05

## Design of high hydraulic low flow test bench

ZHU Yiwen, CHEN Xiangping

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Hydraulic technology automation has become an indispensable part of industrial production and a trend in industrial development. The integration of electromechanical and hydraulic systems can achieve flexibility and intelligence in hydraulic systems, fully leveraging the advantages of large hydraulic transmission power, small inertia, and fast response. In the era of localization of large aircraft, the localization of their supporting testing equipment has also become a necessary demand. According to the performance requirements of hydraulic components in spacecraft door systems, this article provides a design scheme for a high hydraulic small flow testing platform, based on PLC as the processor of the control part, and LabVIEW to design the human-machine interaction interface of the upper computer. The design method of the system hardware and software is described in detail, and the experimental platform is verified through practical experiments. The research results indicate that the entire test bench meets the integrated design of control and driving functions and has fault detection capabilities. It has a certain degree of fault tolerance during the execution of system instructions, ensuring reliability and safety.

**Key words:** hydraulic; test bench; PLC; LabVIEW; mechatronics and hydraulic integration

## 0 引言

在现代工程中液压系统得到了广泛使用,工程进度与液压系统的工作性能息息相关。液压系统的测试技术发展自动化程度最高的是以美国、日本和德国为代表,同时以上国家掌握了液压构件试验台的顶级测试技术<sup>[1]</sup>。

过去一段时间国内液压构件生产技术以及检测技术相对落后,在一些动态性能检测项目方面可能

还不完善,同时在试验台上液压传感器检测误差较大。由于液压测试技术落后的原因,同时也严重制约了液压构件生产技术的快速发展<sup>[2-4]</sup>。现在中国对液压检测系统的研究得到了迅速的发展,已经超出了当初的预期水平<sup>[5]</sup>。

近年随着国家的大力支持,得益于“一带一路”经济战略、铁路及城市轨道交通规划等政策的实施推进,到2019年,国内液压行业工业总产值达到了641亿元<sup>[6]</sup>。在如今大型飞机国产化的时代,配套

基金项目:国家自然科学基金(51867007)。

作者简介:朱绎闻(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向:控制工程。

通信作者:陈湘萍(1977—),女,博士,教授,主要研究方向:综合能源管理。Email:384198892@qq.com。

收稿日期:2023-12-15

的液压构件试验台也成为了不可缺少的一环,实现液压构件试验台的自动控制,检测项目全面,同时提高检测结果的准确性是当前时代提出的新需求<sup>[7-8]</sup>。随着测控技术及装备智能化的发展,终端应用能实现液压传动技术与电控技术有效结合,改变传统的控制形式,提升液压系统响应性能<sup>[9-10]</sup>。

## 1 高液压小流量试验台设计方案

控制系统组成如图 1 所示,设计目标是根据航天器舱门系统液压构件的性能需求,设计一款能够测试液压构件在高压强小流量情况下的合格率的试验台,针对被试件液压性能测试的需求:流量精度 0.01 L,误差 $\pm 0.03$  L/min;压力精度 0.1 MPa,误差 $\pm 0.3$  MPa,对其原理以及方法进行研究分析,确定液压试验台的液压原理图和设计方案。在液压控制系统方面设计了包括 PLC 程序设计和基于 LabVIEW 实时监测和人机交互界面设计,能够在 LabVIEW 上调整参数并通过 PLC 作为控制核心,对液压试验台的数据进行实时监测与调整。试验台交互界面能够实时调整各项实验参数,监控界面能够直观地显示包括电机转速、流量、压力、温度和污染度等各项数据,实时监控液压试验台运行状况,实现测试需求。试验台提高了测量精度和安全系数,并且操作简单。

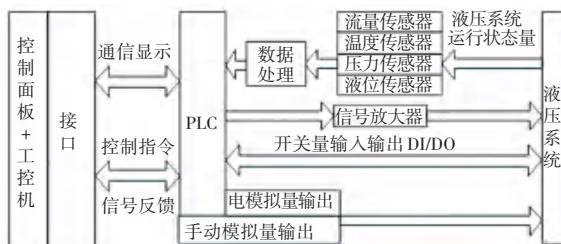


图 1 控制系统组成

Fig. 1 Control system composition

控制核心 PLC 采用的是西门子 PLC 中央控制单元 CPU1214C 高性能矢量控制变频器,其模块化、无风扇设计、易于实现分布式结构以及方便的操作,推动了更精密控制器系列的进一步发展。该系列变频器基于先前版本的成功经验,从而使其在电动机控制领域获得了广泛运用<sup>[11-12]</sup>。

检测系统的软件采用 LabVIEW 进行编写。LabVIEW 是一种基于 G 语言图形化编程的测试系统软件,获得了工业界、学术界和研究实验室的广泛认可,视为一个标准的数据采集和仪器控制软件<sup>[13]</sup>。

## 2 液压系统构成及原理

### 2.1 液压系统原理

液压原理如图 2 所示,液压部分主要由能源系统、能源压力调节系统、供油选通系统、产品进口压力调节系统、产品出口压力调节系统、过滤系统、冷却系统、在线污染度检测系统、压力测试系统和流量测试系统等组成。试验台共配置了 6 个压力变送器、3 个流量传感器、1 个温度传感器和 2 个指针压力表,指针表分别安装在能源泵出口油路和循环过滤系统油路上,用于检测能源泵出口调节压力和循环系统压力。温度传感器安装在油箱上,用于检测油箱油液温度。压力变送器分别安装在 3 路被试产品进口油路和出口油路上,可分别对产品进口压力和出口压力进行测量。流量传感器安装在 3 路产品出口油路上,可分别对每路被试产品流量进行测量。试验台采用水冷式散热器对油液温度进行冷却,散热器安装在独立的循环过滤油路上,冷却水进口配置一电磁水阀,通过控制电磁水阀通断,从而控制油液温度升高和降低。

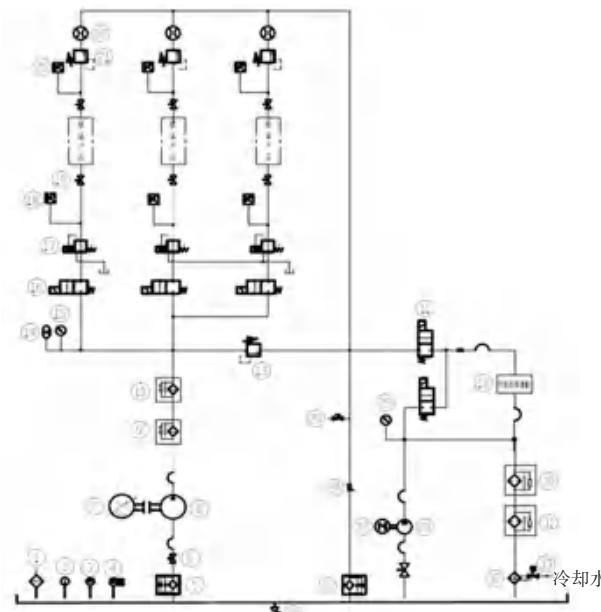


图 2 液压原理图

Fig. 2 Schematic diagram of hydraulic principle

### 2.2 液压系统组成

(1) 能源系统: 主要由油箱组件(200 L)、变频电机(30 KW, 4 极)、高压柱塞泵(23 ml/r, 40 MPa)组成。油箱上配置有液位液温计、液位控制继电器、空气滤清器和温度传感器等,可实时显示油箱液位,并具备油箱高、低液位报警功能。能源系统分为 3

路供油油路,其中一路为大流量供油,单独使用,另外两路并联油路为小流量供油油路,可同时安装2件产品。因被试产品小流量的较多,当流量大于15 L/min时,可使用大流量供油管路;当流量小于15 L/min时,可使用小流量供油管路。

(2)能源压力调节系统:主要由一个直动式溢流阀组成。直动式溢流阀可直接调节系统的安全压力,也就是系统供油压力。能源系统压力最高可设定40 MPa。

(3)供油选通系统:电磁通断阀如图3所示。主要由3路电磁通断阀和阀块组成。左边单独的电磁通断阀可单独控制大流量产品进口油液通断,其余2路电磁通断阀可实现小流量被试产品进口油液选通。

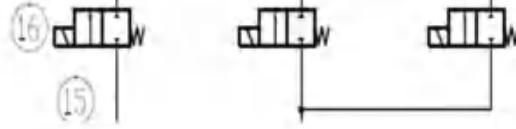


图3 电磁通断阀

Fig. 3 Electromagnetic on/off valve

(4)产品进口压力调节系统:比例减压阀如图4所示。产品进口压力调节主要由3路比例减压阀组成,左边单独的比例减压阀可对大流量产品进口压力进行调节,其余2路比例减压阀并联使用,可分别对小流量2路产品进口压力进行调节。

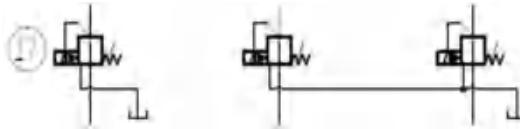


图4 比例减压阀

Fig. 4 Proportional pressure reducing valve

(5)产品出口压力调节系统:直动式溢流阀如图5所示。产品出口压力调节主要由3路直动式溢流阀组成,左边单独的溢流阀可对大流量产品出口压力进行调节,其余2路溢流阀可分别对小流量2路产品出口压力进行调节。

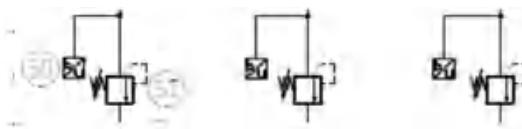


图5 直动式溢流阀

Fig. 5 Direct acting relief valve

(6)过滤系统:过滤系统如图6所示。过滤系统主要由油箱独立循环过滤系统( $10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}$ )、能源泵进口过滤器( $180 \mu\text{m}$ )、能源泵出口过滤器

( $10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}$ )、系统回油过滤器( $10 \mu\text{m}$ )组成,独立循环过滤系统可实现对油箱油液独立循环过滤;其余过滤器可对能源系统中各部分管路油液进行过滤,确保油液的清洁度。能源泵出口过滤器过滤精度为( $10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}$ ),滤芯材质为进口玻璃纤维,具有过滤精度高、通油能力强、原始压力小、纳污量大等优点。

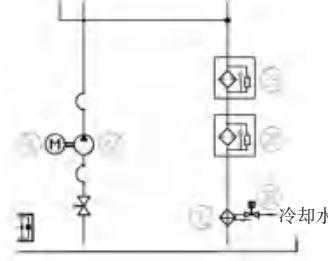


图6 过滤系统

Fig. 6 Filtering system

(7)冷却系统:系统采用水冷式散热器对油液进行降温,散热器安装在独立的循环过滤系统管路上,散热器进水口配置一电磁水阀,通过设定电磁水阀的通断来控制散热器工作,从而实现油液温度的升高和降低,满足系统温度使用要求。

(8)在线污染度检测系统:主要由电磁通断阀、手动节流阀、污染度检测仪和检测软管等组成,检测系统布置在系统回油管路和独立循环管路上,通过选通电磁通断阀可分别对产品出口油路和系统循环油路的油液污染度进行在线检测。当检测产品出口管路的油液污染度时,需调节手动节流阀,确保产品出口的油液通过污染度检测仪。

(9)压力测试系统:压力测试系统由6个压力变送器组成,变送器的量程为0~60 MPa,精度为 $\pm 0.25\%$ ,分别安装在大流量产品进、出口油路和小流量产品2路进、出口油路上,可分别对大流量产品进、出口压力和2路小流量产品进、出口压力进行测量。

(10)流量测试系统:流量测试系统由3个流量传感器组成,分别安装在产品出口管路上,可分别对大流量产品出口流量和2路小流量产品出口流量进行测量。流量计采用进口品牌的齿轮流量计,流量计测试精度为 $\pm 0.1\%$ 。

### 3 高液压小流量试验台软件总体设计

#### 3.1 软件总体设计概述

以LabVIEW软件编写的应用软件为机人界面,通过工控机向PLC发出调节参数设定和各种设备

的运行指令,结合比例阀放大器、固态继电器、一系列接触器、中间继电器等和各种控制量所需的传感器,用以完成所需控制功能,同时工控机通过数据采集卡对所有传感器数据进行采集、存储和数据处理。

### 3.2 计算机测控系统

计算机测控系统以工控机为核心,LabVIEW 测控软件与 NI CompactRIO 控制器通过以太网建立通讯后,将控制参数和指令发送给 NI CompactRIO 控制器,同时对 NI CompactRIO 控制器传回的参数进行显示和控制,对数据进行采集并存储到数据库。

NICompactRIO 是一个高级嵌入式控制和监测系统,由一个实时处理器、一个 FPGA 和若干热插拔 C 系列模块组成。NI CompactRIO 使用 LabVIEW 系统设计软件进行编程。由于 NI CompactRIO 是分布式实时系统,还使用 LabVIEW Real-Time 模块和可选的 LabVIEW FPGA 模块。开发计算机必须安装 NI-RIO 驱动程序,以支持 NI CompactRIO 实时控制器、可重配置机箱和 C 系列模块<sup>[14-18]</sup>。

以 LabVIEW 设计的人机交互界面如图 7 所示,可对所需参数进行实时检测和调控,且能够确保安全性。



图 7 LabVIEW 监控程序

Fig. 7 LabVIEW monitoring program

主要测量及控制参数:测控所有的压力、流量、温度等传感器的输出信号均选择标准电流、电压或脉冲信号,信号调理模块和数据采集卡的输入信号均选择标准的电压或电流信号。测控系统应具有良好稳定性、可靠性、抗干扰能力和可维护性。

## 4 电气设计方案

### 4.1 电气原理

液压试验台的电气原理如图 8 所示。

电气部分主要为执行机构,PLC 通过 RS232 串口与工控机通讯,接收工控机发出指令,按照程序进

行计算,输出控制信号,各接触器、继电器、电机及电磁阀根据接收到的指令执行相应动作以达到控制要求。

(1) 电机的启动、停止保护功能。通过相关控制来完成主电机的启动、停止、保护等功能;用相应的交流接触器、熔断器和热继电器执行循环过滤泵电机的启动、停止和保护功能。

(2) 提供直流稳压电源。把 220 V 交流电源变换为直流稳压电源,为 PLC、传感器、比例阀、报警信号和其他控制元器件提供直流稳压电源。

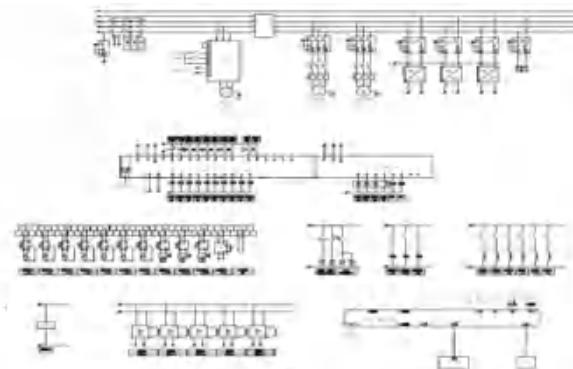


图 8 电气原理图

Fig. 8 Schematic diagram of electrical principle

### 4.2 电机及传感器组件设计方案

(1) 电源组件:主要功能为分析控制组件、传感器组件、电机驱动组件供电;主要构成有控制电源组件、功率电源组件;选型一般为航空级 EMI 过滤器、隔离型 DC-DC 转换器或同类型国产器件。

(2) 电机驱动器组件:主要功能为将分析控制模块输出的脉冲信号转换为功率信号驱动执行电机运转;主要构成有隔离耦合器件、功率器件、过流保护电路;选型为光耦作为隔离耦合器件,MOS 功率管作为功率放大器件。

(3) 传感器组件:功能为感知舱门位置状态、电机运转状态,构成有传感器单元(位置开关、编码器)、传感器信号处理单元(传感器、电流、电压采样信号调理电路),选型根据具体结构需求选择微动开关作为位置传感器,编码器根据具体电机型号进行配套<sup>[19-20]</sup>。

## 5 制造工艺

液压测试台是非标准设备,其制造过程较为复杂,包括机械、液压和电气等元件的采购、加工、制造、组装和调试等过程,其通用制造工艺流程如图 9 所示。

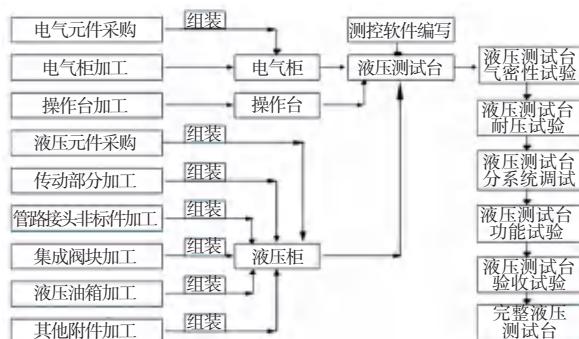


图 9 制造工业流程图

Fig. 9 Manufacturing industry process diagram

## 6 调试设计及结果

对搭建好的高液压小流量试验台进行实验验证,观察其是否能满足正常使用要求。搭建完成的试验台外观如图 10 所示。



图 10 搭建完成的试验台

Fig. 10 Completed test bench

根据标准被试件的工作要求(压力 25~40 MPa,温度 10℃~78℃,流量为 10~30 L/min,测试时长为 30 s),液压试验台的流量与压力测试结果见表 1。如果测试标准被试件时误差过大,则视为调试失败。

表 1 被试件压力与流量测试要求

Table 1 Test requirements for pressure and flow rate of test specimens

序号	压力/MPa	温度/℃	流量/(L·min⁻¹)	时长/s
1	24.7	31	10.01	30
2	30.2	36	15.00	30
3	35.3	42	19.98	30
4	39.8	48	25.02	30
误差	±0.3	±2	±0.03	±1

通过实验可以看出,本文设计的航空器舱门控制系统能够满足使用要求。

## 7 结束语

设计了基于 PLC 与 LabVIEW 的高液压小流量

试验台,该试验台的设计旨在对飞行器液压构件的性能是否合格进行检测。经实验表明,整个系统满足对液压构件液压性能的检测能力,具备控制与驱动功能一体化设计且具备故障检测能力,在系统指令执行的过程中具备一定容错能力,确保可靠性和安全性;试验台具备自检能力,能进行故障检测并向上位机报错,另外还可以通过 LabVIEW 界面设定不同的阈值,具有较好的实际应用价值。

## 参考文献

- [1] 张立军,刘克铭. 液压缸试验台液压系统的初步设计[J]. 机床与液压,2008(12): 110~112.
- [2] 张晓东,苏东海. 液压缸试验台计算机控制系统的[J]. 机械工程与自动化,2010(4): 149~151.
- [3] 周宝花,蔡洪波. 液压缸试验台液压系统的改进[J]. 液压气动与密封,2011,31(2): 88~89.
- [4] 吴晓玲,杨大光. 液压缸试验台电、液控制系统研究和应用[J]. 机电工程,2000,17(5): 53~54.
- [5] SU Donghai, YANG Yang. Research about hydraulic cylinder test bench based on PLC [J]. Advanced Materials Research, 2012, 422: 200~203.
- [6] 王飞. 液压缸试验台测控系统研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2012.
- [7] 李涛. 大型伺服液压缸试验方法研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
- [8] 刘衡. 液压缸的技术发展[D]. 液压气动与密封,2004(3): 10~12.
- [9] CAI Xiaoyan, CHEN Yuan. Analysis of key technologies for measurement and control of hydraulic cylinder test bench [J]. Modern Computer, 2019, 24: 26~29.
- [10] LI Delong, WANG Xiaoyun, ZHAO Cunran, et al. The development of the power recovery type hydraulic pump reliability test bench [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, 12: 31~34.
- [11] 陈东宁,徐海涛,姚成玉. 大缸径长行程液压缸试验台设计及工程实践[I]. 机床与液压,2014,42(3): 79~84.
- [12] 周静红. 基于 PLC 控制的液压缸试验台的研究[J]. 电子技术,2013(12): 55~56.
- [13] 傅海轮,李建华,叶树明,等. 液压缸综合试验台测控系统的研制[J]. 机床与液压,2006(2): 118~120.
- [14] 曾亿山,李文新,夏永胜. 液压缸综合性能检测试验台液压系统的研究开发[J]. 煤矿机械,2008(8): 97~99.
- [15] 陈军,洪始良. 基于模块化的液压缸试验台测控系统设计[J]. 机械设计与制造,2010(7): 41~43.
- [16] 王松军,谢永洋,赵静一,等. 冶金液压缸试验台设计与分析[J]. 冶金设备,2015(5): 41~47.
- [17] 李会明,姜涛,张桂林. 基于 LabVIEW 的座椅试验台控制系统设计[J]. 机械工程师,2016(2): 107~110.
- [18] 宋学贤,谈宏华,王科敏,等. 基于 LabVIEW 的液压缸综合性能测试系统设计[J]. 液压与气动,2012(9): 116~118.
- [19] 钟日良,彭天好,张磊. LabVIEW 在液压缸试验测控系统中的应用[J]. 机床与液压,2014,42(7): 39~41.
- [20] 陈兵,徐维军. AGC 液压缸测试试验系统的应用[J]. 液压气动与密封,2010,30(11): 39~43.