

无人机燃油系统增压泵性能测试系统设计

卿绿军¹, 晁文雄¹, 周创辉¹, 许睿²

(1. 西安航空学院 液压技术研究院, 陕西 西安 710077;

2. 西安航空学院 机械工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:针对无人机用高性能增压泵的研制需求,开发了一套无人机燃油系统增压泵性能测试系统。通过分析试验台组成及其工作原理,确定了测试系统的总体方案;以 USB-4711 多功能数据采集卡为核心,搭建了测试系统的硬件系统;采用 LabVIEW 软件,开发了基于 PID 算法的测试系统上位软件;以 DCW2-1828 离心泵为被测试验件,对所搭建测试系统的功能进行了验证,其结果表明:该测试系统信号采集、信号处理、信号输出、数据显示等功能均能正常工作,其压力控制误差小于 2%,验证了测试系统的有效性,为高性能增压泵研制提供实验基础。

关键词:无人机;燃油增压泵;LabVIEW;性能测试

中图分类号:TH137

文章编号:1000-0682(2025)05-0031-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.05.006

Performance measurement system for centrifugal pump in UAV fuel system

QING Lijun¹, CAO Wenxiong¹, ZHOU Chuanghui¹, XU Rui²

(1. Xi'an Aeronautical Institute National Joint Engineering Research Center for Special Pump Technology, Shaanxi Xi'an 710077, China;

2. Xi'an Aeronautical Institute School of Mechanical Engineering, Shaanxi Xi'an 710077, China)

Abstract:To meet the development requirements of high-performance centrifugal pumps for UAV fuel system, a performance measurement system for centrifugal pumps is designed. The working principle of the centrifugal pump performance measurement system is first analyzed, leading to the determination of the overall system design. The hardware system is then constructed using the USB-4711 multifunctional data acquisition card as the core component. The performance measurement system for the centrifugal pump is subsequently developed using LabVIEW software, enabling the collection of performance parameters, adjustment of operating conditions, data processing, and the display and storage of data during the testing process. Finally, through the experimental test on the centrifugal pump performance, it is shown that the system can meet the performance measurement requirements for centrifugal pumps in UAV fuel systems, and the feasibility of the system is verified. The results show that the signal acquisition, signal processing, signal output, data display and other functions of the testing system can work normally, and the pressure control error is less than 2%, which verifies the effectiveness of the testing system and provides experimental foundation for the development of high-performance centrifugal pump.

Keywords:UAV; fuel centrifugal pump; LabVIEW; measurement

0 引言

无人机技术的快速发展使其在军民领域中获得

了广泛的应用。随着任务的多样化和服役环境的复杂化,对新一代无人机的性能和续航能力提高了更高要求^[1-3]。燃油增压泵作为飞行器燃油系统的关键技术,向发动机燃油主泵供给稳定的带压燃油,其性能对发动机主燃油泵的运行效率和运行安全具有重要影响^[4-6]。

离心式燃油增压泵具有结构简单、工作可靠、性能稳定等特点,已成为飞行器燃油系统增压泵的主

收稿日期:2025-05-06

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目 2023-JC-YB-407、校级科研基金项目 2022KY0206 和 2024KY0222。

第一作者:卿绿军(1987-),男,汉族,四川绵阳,博士,讲师,研究方向为航空机电液测控系统研究。

要结构类型。国内外学者采用理论计算、数值模拟和试验验证等方法研究了燃油离心增压泵效率、吸油、空化等性能。仲世杰等提出了基于超参数双调和方程代理模型的航空燃油离心增压泵优化设计方法,提高了增压泵的效率,改善了叶片载荷梯度^[7]。张岭等采用 Mixture 多相流模型对不同结构参数条件下液环式航空燃油增压泵自吸阶段的流场进行数值仿真研究,揭示了增压泵自吸过程中的能量损失机制^[8]。唐庆等采用滑移网格技术和雷诺平均方法研究了不同工况下燃油增压泵内部流场特性,揭示了转速对增压泵出口压力和流量的影响规律^[9]。刘洋等在分析燃油离心增压泵关键部件的故障模式的基础上建立了燃油离心增压泵的可靠性模型,评估了燃油增压泵的平均故障间隔时间^[10]。李嘉等采用数值模拟和性能实验的方法研究了航空燃油离心泵内部流场压力脉动及非定常流动,揭示了设计流量工况下叶轮流道内压力脉动变化规律^[11-12]。李婉琦等采用基于修正的 SST $k-\omega$ 模型和 Zwart 模型的数值模拟方法,研究了介质温度和工作高度对燃油增压泵吸油特性,验证了介质温度和工作高度对燃油增压泵吸油特性影响显著^[13]。蒋辉等搭建了基于 MATLAB/Simulink 仿真平台的燃油离心泵仿真模型,研究了边界条件对增压泵的最大增压值和最小增压值的影响^[14]。贺青等采用正交实验和数值计算方法对离心增压泵的汽蚀特性进行了研究,并通过对叶轮相关结构参数的优化提高了增压泵的抗汽蚀性能^[15]。张同等针对飞机燃油系统状态实时监控的问题,搭建了基于 DDS 分布式组态软件的飞机燃油系统监控平台,能够实现了对飞机燃油系统实时监控,提高了飞机燃油系统协同仿真效率^[16]。Deepak Kumar 等提出一种改进的 InceptionV3 深度卷积神经网络(CNN)方法来识别离心增压泵阻塞故障特征^[17]。Michael Mansour 等采用实验方法研究了在不同气液两相流条件下 3D 半开式叶轮和 2D 半开式叶轮的结构参数对离心增压泵性能特性的影响规律^[18]。

近年来,随着无人机服役环境复杂性和续航能力的提升,对燃油增压泵性能提出了更高要求,而增压泵的性能受多种因素的影响,如工作介质特性、密封结构、加工装配工艺等^[19-22],传统的数值模拟和理论分析难以满足无人机用增压泵研制的需求,因此,开发一套针对无人机燃油系统增压泵的测试系统,为研制高性能无人机用增压泵提供实验支撑显得尤为重要。

该文分析了无人机燃油系统增压泵性能测试系统工作原理,提出了基于 LabVIEW 和 USB-4711 多功能数据采集卡为核心的测试系统的总体方案,搭建了测试系统的软硬件系统,实现了增压泵性能测试过程中性能参数采集、工况条件调节、数据处理、数据显示与存储等功能,并开展了增压泵性能测试系统试验,验证了该系统的可行性,为无人机燃油系统增压泵性能评估与优化提供支撑。

1 增压泵性能测试系统总体设计

1.1 系统原理图

设计的无人机燃油系统增压泵性能测试系统如图 1 所示,主要由模拟油箱、被测增压泵、驱动电机、压力传感器、流量传感器、温度传感器、比例阀、计算机等组成,其工作原理是利用电机驱动被测增压泵工作,通过比例阀调节被测增压泵出口压力来模拟其不同工况点,再通过被测增压泵出口管路上安装的压力传感器、流量传感器、温度传感器得到不同工况点状态下被增压泵的压力流量特性。

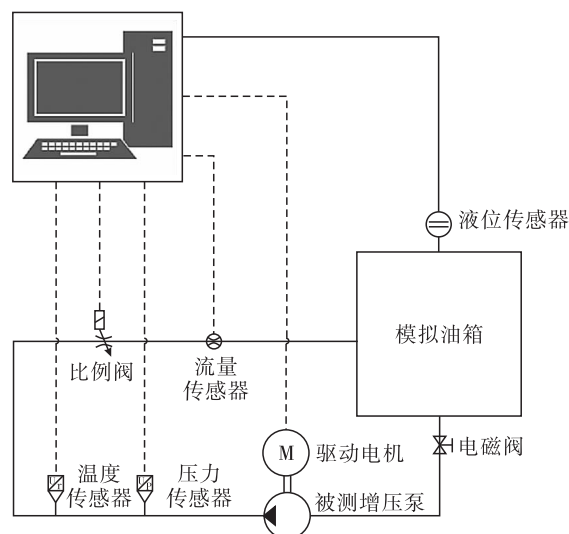


图 1 增压泵性能测试系统原理图

1.2 系统整体框架

结合测试系统原理图,该文所设计的测试系统整体框架如图 2 所示,主要由传感器模块、信号调理模块、继电器模块、多功能数据采集卡、计算机、电磁阀等组成,其中传感器模块包括压力传感器、流量传感器和温度传感器,以获取被测增压泵性能参数;信号调理模块主要用于对传感器输出信号进行信号调理以减小外界干扰;功能数据采集卡完成传感器数据采集以及输出控制信号调节比例阀、驱动电机以及电磁阀的工作状态以满足增压泵测试要求;计算机的上位机测控平台实现对被测增压泵运行状态信

息的采集、处理、显示、存储以及状态报警等。

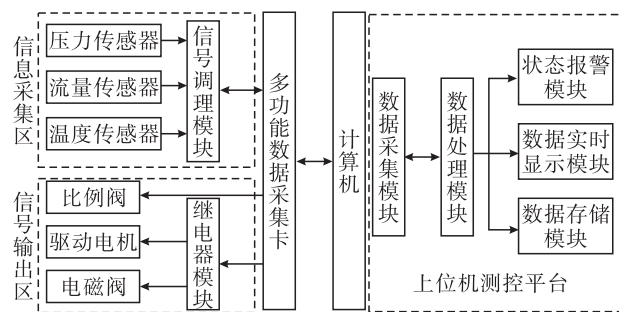


图2 测控系统整体框架图

2 测试系统设计

2.1 硬件设计

测控系统硬件由多功能数据采集卡、继电器板卡、信号调理模块、计算机、传感器等组成,其中多功能数据采集卡选用研华 USB-4711,包括采样率为 150 KS/s 的 16 个 12 位单端模拟输入通道、2 路 12 位模拟量(AO)输出通道、8 路 TTL 电平输入通道和 8 路 TTL 电平输出通道等,能够满足测试系统流量、压力和温度等传感信号采集、比例阀、驱动电机以及电磁阀控制等功能需求。

继电器板卡选用 RS-SSK 固态继电器板卡,通过数据采集卡的输出的 TTL 电平来控制固态继电器板卡的输出 24DC 信号,用于控制电磁阀的通断,同时通过控制中间继电器和交流接触器来实现对驱动电机的控制。信号调理模块选用 GC5054 隔离式安全栅,实现将传感器输出信号 4~20 mA 转换为 1~5 V。

采用 LWL11 涡轮流量计来测量被测增压泵的出口流量,该传感器的输出信号为 4~20 mA,其测量范围是 60~600 L/h,其精度等级为 0.5 级;选用 CYYZ11A 通用型压力变送器来测量被测增压泵出口压力,该传感器的输出信号为 4~20 mA,其测量范围是 0~1 MPa,其精度为 0.25% FS。采用 GDB161 比例阀调节被测增压泵出口压力,其控制信号为 0~10 V。

2.2 软件设计

采用 LabVIEW 软件来开发无人燃油系统增压泵性能测试系统的上位机系统,通过多功能数据采集卡,实现被测增压泵输出流量、出口压力、介质温度、油箱液位等信息采集以及对开关阀、比例阀和驱动电机等执行元件的控制。基于模块化设计思想,该文设计的上位机系统由初始化、信号采集输出、数据显示与保存等模块组成,其中信号采集输出

模块包括信号采集、信号处理、PID 算法和信号输出等子模块组成,上位机系统的开发流程如图 3 所示。

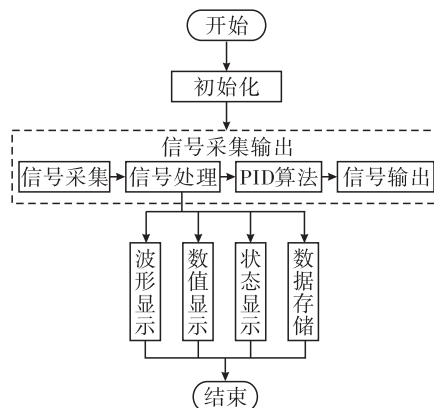


图3 上位机系统流程图

(1)初始化模块。通过该模块完成对信号采集模块、信号处理模块、信号输出模块、显示模块、状态标志等软参数的配置、返回试验系统硬件配置的状态信息。

(2)信号采集输出模块。该模块包括信号采集、信号处理、PID 算法和信号输出等 4 部分,其中信号采集通过将研华 DAQNavI 控件配置为模拟量数据采集的功能,实现试验系统的流量、压力、液位、温度等信号数据的采集;信号处理子模块通过 LabVIEW 信号处理中 Butterworth 滤波器子 VI 对传感器信号处理,去除不需要的干扰频率成分,获得更加清晰和准确的信号;输出模块通过研华 DAQNavI 控件配置为模拟量输出和数字量输出模块的功能,实现试验系统比例阀、电磁阀和驱动电机等控制信号的输出。

(3)PID 算法模块。PID 是比例、积分、微分三种环节于一体的控制算法,是工业领域中技术最为成熟、应用最为广泛的一种控制算法。在增压泵性能测试过程中,通过压力传感器来检测被测增压泵出口的实际压力,将实测压力值与被测增压泵出口压力目标值比较得到偏差值,在此基础上,通过 PID 算法计算出对应输出信号来调节系统中比例阀开度大小,从而使被测增压泵出口压力达到一个稳定的状态,如图 4 所示。

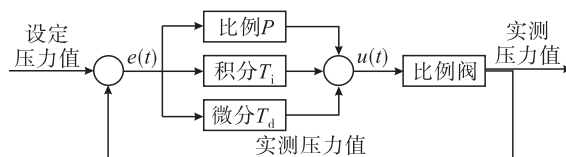


图4 系统压力 PID 调节示意图

被测增压泵出口压力控制规律为:

$$u(t) = P[e(t) + \frac{1}{T_i} \sum e(t)\Delta t + T_d \frac{e(t_n) - e(t_{n-1})}{\Delta t}] \quad (1)$$

其中： Δt 表示 LabVIEW 中 PID 算法模块的循环周期； $u(t)$ 表示比例阀电磁线圈的控制电信号； $e(t)$ 表示设定压力值与实测压力值之间的差值。

采用 LabVIEW 的控制与仿真函数面板中的 PID 子 VI 来搭建被测增压泵出口压力 PID 控制算法程序如图 5 所示。

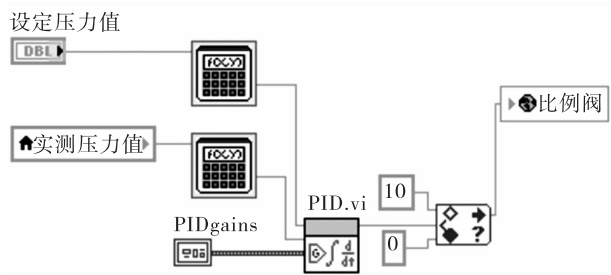


图 5 基于 LabVIEW 的增压泵压力 PID 算法程序

(4) 数据存储模块。该模块将试验过程中流量、压力、温度等性能参数输出至工控机计算机本地,为增压泵性能分析以及结构优化的基础提供数据支撑。

(5) 数据显示模块。基于 LabVIEW 软件中的图形控件以曲线形式和数值控制记录测试过程中对应性能参数总体变化趋势以及对应性能参数实时值。

(6) 上位机界面。测试系统的人机界面由初始化、数据保存、开始、结束、波形图表、数值显示等功能组成,其中 2 种波形图表分别用来显示试验过程被测增压泵出口压力和出口流量,如图 6 所示。

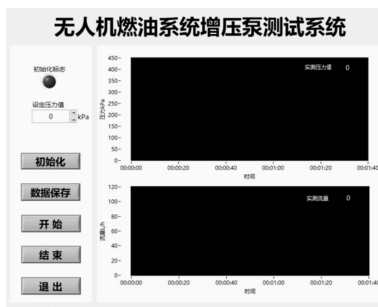


图 6 上位机系统工作界面

3 试验验证

该文以 DCW2-1828 离心泵作为被测试件,对无人机燃油系统增压泵性能测试系统的性能。在试验过程中,通过上位机软件人机界面来不同工况点下被测泵出口压力值,再经过 PID 算法输出对应

控制信号调节比例阀开度,获得不同工况下被测增压泵性能特性,如图 7 所示。

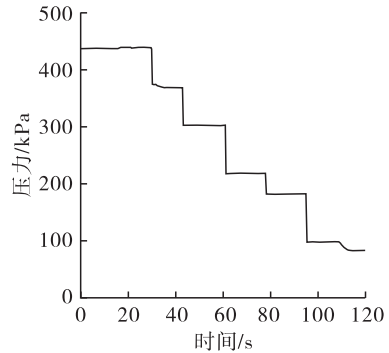


图 7 工作点下被测泵出口压力曲线

表 1 不同工况点测试压力值

序号	设定压力/kPa	实测压力/kPa	相对误差/%
1	440	436.3	0.8
2	370	368.6	0.4
3	300	302.6	0.9
4	220	218.5	0.7
5	185	182.6	1.3
6	100	98.6	1.4
7	85	83.9	1.3

由图 7 和表 1 可知,在不同工况条件下,试验台测控系统通过 PID 算法调节比例阀开度,实现对被测增压泵出口压力的调节。在不同工况点下,被测增压泵出口实测压力最大误差不超过 2%。

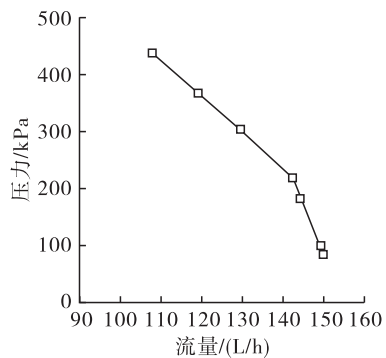


图 8 被测增压泵性能曲线

由图 8 可知,在出口压力 85 ~ 440 kPa 的工况范围内,随着被测泵出口压力的降低,其输出流量由 107.7 h/L 逐渐增加至 149.7 h/L,与被测增压泵工作性能曲线变化趋势一致。

综合上述,该文所设计的无人机燃油系统增压泵测试系统能够完成对增压泵性能相关参数的采集、显示以及数据输出的功能,为后续高性能无人用增压泵的研制提供了试验支撑。

4 结论

该文开发了基于 LabVIEW 平台和多功能数据采集技术的无人机燃油系统增压泵测试系统。根据试验系统的工作原理,设计了测试系统整体方案,搭建了基于 USB - 4711 采集卡的硬件系统和基于 LabVIEW 的上位机系统;以 DCW2 - 1828 离心泵作为被测试件,对测试系统的性能进行了验证,其结果表明,在 85 ~ 440 kPa 的工况范围内,试验系统压力的控制误差小于 2%,验证了系统的功能和有效性,为后续开发高性能无人机用增压泵提供了实验条件。

参考文献:

- [1] 刘洋,孙博,吴晓丹,等. 燃油离心泵可靠性仿真[J/OL]. 航空发动机,1 - 6[2025 - 04 - 22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1359.V.20241225.2003.010.html>.
- [2] 魏志强,王晶. 大型固定翼无人机跟随民航机的尾流安全评估方法[J]. 安全与环境学报,2024,24(12):4533 - 4541.
- [3] 范田昊,张士卫,薛小伟,等. 低成本可消耗无人机极限不可用燃油量确定方法研究[J]. 航空科学技术,2024,35(09):29 - 34.
- [4] 仲世杰,符江锋,刘显为,等. 基于超参数双调和方程代理模型的航空燃油离心泵多目标优化[J]. 推进技术,2024,45(12):107 - 119.
- [5] 陈璇,李嘉,李斌,等. 基于 Kriging 的多阶段加点策略及离心叶轮汽蚀优化[J]. 西北工业大学学报,2024,42(03):467 - 476.
- [6] 符江锋,仲世杰,刘显为,等. 耦合双层参数更新的改进 PCE 模型在燃油离心泵不确定性分析中的应用[J]. 航空学报,2024,45(21):194 - 212.
- [7] 张岭,杨兴,李一鸣,等. 液环式航空燃油离心泵自吸性能[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(04):342 - 349.
- [8] 李婉琦,黎义斌,汪波,等. 航空燃油离心泵高空吸油特性数值研究[J]. 推进技术,2024,45(12):255 - 266.
- [9] 刘荣升,张岭,李一鸣,等. 燃油离心泵内流特性分析[J]. 工程机械,2023,54(12):88 - 96 + 10.
- [10] 张同,陈聪. 飞机燃油系统组态监控设计[J]. 工业控制计算机,2023,36(06):22 - 24 + 27.
- [11] 邹品文,马高长,严社斌,等. 基于燃油离心泵叶轮轴向力测试技术的研究[J]. 应用力学学报,2024,41(03):509 - 515.
- [12] 蒋辉,黄昆,赵辉. 某型直升机离心式燃油增压泵增压值设计[J]. 南京航空航天大学学报,2022,54(02):233 - 238.
- [13] 李嘉,李华聪,张伟,等. 高压燃油离心泵压力脉动及非正常流动分析[J]. 西北工业大学学报,2022,40(01):199 - 205.
- [14] 王科雷,周洲,马悦文,等. 垂直起降固定翼无人机技术发展及趋势分析[J]. 航空工程进展,2022,13(05):1 - 13.
- [15] 唐庆,单金光,周振华,等. 航空燃油离心泵内流特性分析[J]. 液压与气动,2021,45(08):183 - 188.
- [16] 杨红英. 燃油增压泵燃油润滑油掺混故障的分析[J]. 机械制造,2021,59(05):82 - 87.
- [17] KUMAR D, SINGH RANAWAT N, KUMAR KANKAR P, et al. InceptionV3 based blockage fault diagnosis of centrifugal pump [J]. Advanced Engineering Informatics, 2025(65):103181.
- [18] MANSOUR M, THÉVENIN D. Impact of blade twisting and tip clearance on centrifugal pump performance under air - water two - phase flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2025(112):109682.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52 - 49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029 - 81871277
网址:<http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱:gyybbjb@126.com