

航天飞行器增压输送系统试验平台设计与研究

杨 波 冯立杰 曹 忠 邱 凯 赵 赛 张 伟 孙晓亮 毛旦平

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)



摘要: 针对航天飞行器燃油加注效率低, 加注过程安全隐患大的特点, 搭建了一套燃油加注排挤试验平台, 可实现多模式燃油加注、燃油排挤自动化、关键过程参数可视化。试验证明该平台设计方案可行、设计合理, 满足了试验需求, 为后续开展联合全流程系统级试验提供了工程基础。

关键词: 燃油加注; 排挤; 试验平台

Design and Research of Test Platform About Pressure Conveying System of Aerospace Craft

Yang Bo Feng Lijie Cao Zhong Qiu Kai Zhao Sai Zhang Wei Sun Xiaoliang Mao Danping

(Shanghai Aerospace Precision Machinery Institute, Shanghai 201600)

Abstract: Because of inefficient fuel injection and potential safety hazard, it is proposed to establish a fuel injection extrusion test platform, on which multi-mode fuel injection, automatic fuel extrusion, and visual parameter monitoring can be achieved. The test indicates that the platform is feasible and reasonable and meets the needs of the test. It provides the engineering foundation for the subsequent development of the joint full-process system-level test.

Key words: fuel injection; fuel extrusion; test platform

1 引言

高超声速航天飞行器是世界军事强国争相发展和研究的热点, 集成了航空、航天领域先进前沿技术, 具有突防能力强、速度快、作战效能大、响应时间短、作战距离远等诸多特点。20 世纪 50 年代以来, 美国、俄罗斯等军事强国相继研制了 X-43A、X-43B、彩虹 D2 等高超声速飞行器^[1]。

我国在高超声速飞行器研究方面起步较晚, 前期研究集中在超燃冲压发动机基础概念和燃烧理论。增压输送系统作为超燃冲压发动机的动力分系统, 是航天飞行器的重要组成部分, 控制燃料按照一定的压力、流量从贮箱输送到发动机燃烧室, 其性能直接影响航天飞行器的动力发挥效率^[2~4]。

在地面模拟试验中, 航天飞行器燃油增压输送系统贮箱内需要加注一定质量的燃料, 并要求按照特定

的排挤速度输送到发动机中。由于贮箱内部结构复杂, 外形尺寸大, 且燃油加注具有一定的危险性, 对加注方式、加注安全性提出了比较苛刻的要求。为提高燃油加注效率、操作安全性, 结合实际需要, 本文拟搭建一套燃油加注排挤试验平台, 开展燃油加注、燃油排挤试验验证工作。

2 试验平台需求分析

某航天飞行器以航空煤油为燃料, 采用挤压式燃油增压输送方式, 贮箱内设计有环形油囊, 油囊与发动机直接相连。正常工作过程中, 贮箱油囊内的燃油在气枕压力的作用下, 按照一定的压力、流量进入发动机燃烧室。增压输送系统涉及燃油加注、定量排挤、关键参数监控等功能需求。同时增压输送系统含有 35MPa 的压力容器气瓶以及易燃易爆燃料, 试验过程

中的安全性设计对平台设计提出了更加苛刻的要求。

为提高加注排挤质量和效率,采用抽真空加注、高点放气加注与定压力排挤相结合的方式,首次加注为抽真空加注,最大限度排除了空气杂质带来的燃油污染,高点放气加注保证贮箱在竖直状态下满量加注。定压力排挤方式与贮箱油囊配合,有利于排挤过程燃油平稳输出。

综合分析,燃油增压输送系统加注排挤试验平台需具备以下功能:

- a. 实时显示燃油加注质量;
- b. 具备提供 100Pa 以下的抽真空的能力;
- c. 具备气动压力燃油加注、排挤功能,气动压力可调;
- d. 能够实现燃油管路自清洗,清洗压力可调;
- e. 能够提供高压氮气,给贮箱气瓶循环充气;
- f. 燃油排挤流量既可手动控制,也可远程通信控制;
- g. 气瓶中氮气压力、温度,贮箱进气压力、贮箱排油压力、贮箱排油流量能够可视化、参数化;
- h. 能够实现燃油排挤时序控制。

3 试验平台设计与实现

3.1 总体设计

根据应用对象特性、试验平台功能需求,对试验

平台开展了模块化设计,如图 1 所示,可分为加注系统、排油系统、检测与控制系统。其中加注系统实现抽真空加注、高点放气加注以及供气接口和燃油称重,排油系统实现燃油的定流量控制,检测与控制系统用于燃油排挤过程时序控制,过程参数监控与处理。

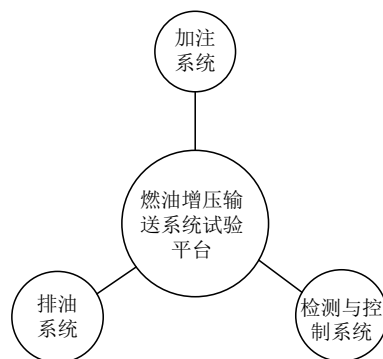


图 1 试验平台模块化示意图

三个子系统与贮箱本体及内部管路构成了完整的增压输送系统燃油排挤试验系统,其管路连接总体框架见图 2。输入侧配气台通过金属软管、手动阀门与加注罐、加油机、液控箱、机身舱连接,输出侧机身舱通过流量计、调节式手动球阀、调节式电动球阀、气动球阀与回收容器连接,输入输出部分构成了加注排挤管路主回路。管路中间各关键部位安装了压力传感器、温度传感器、流量传感器等状态感知智能部件,检测与控制系统采集智能部件的信息进行筛选处理。

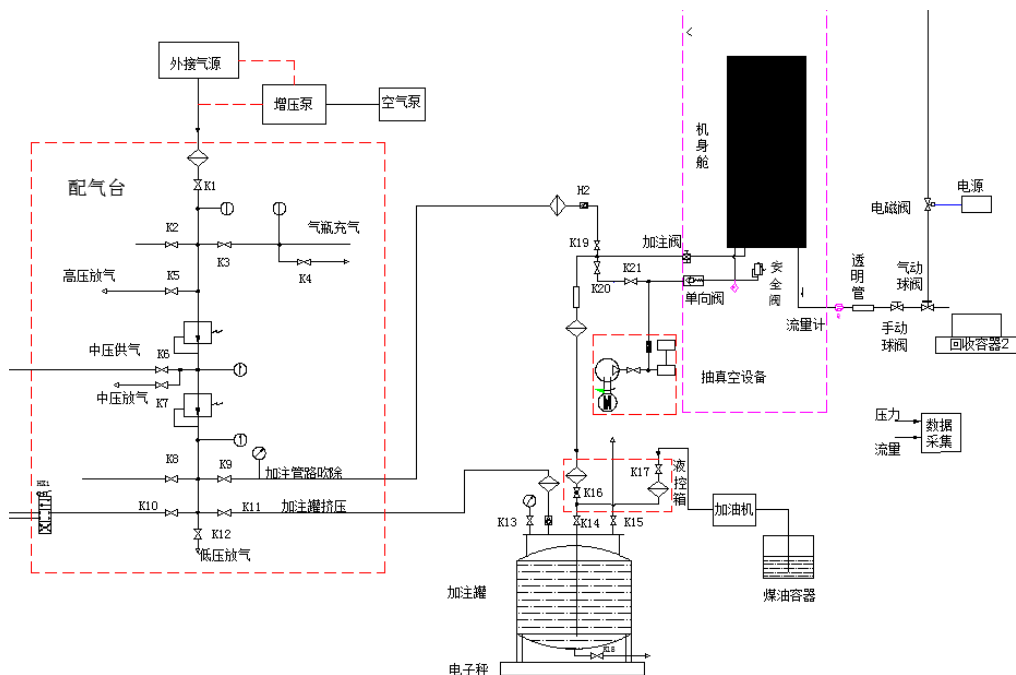


图 2 燃油增压输送系统加注排挤试验平台总体连接图

3.2 加注供气系统设计

加注供气系统集成配气台、加注罐、加油机、抽真空机、过滤器、手动阀门于一体,实现供气、加注罐补油、油量定量加注、贮箱抽真空,满足抽真空加注、高点放气加注需求。抽真空机、加油机、过滤器、手动阀门均选用标准产品。配气台、加注罐则根据功能需要进行了定制化设计。

加注供气系统工作原理:抽真空加注时,贮箱水平放置,抽真空机持续工作,将油囊、贮箱内的空气抽至 100Pa 以下,然后打开加注供气阀门,利用压差,将加注罐内的煤油输送至油囊内,同时读取电子秤的数值,控制加注燃油的质量;高点放气加注时,贮箱翻转为竖直状态,加注口在下方,打开供气阀门持续加压,直到回收容器内溢出煤油,贮箱加满。

3.2.1 配气台设计

配气台是试验平台重要的组成部分,其为加注、排挤、充气、除杂质提供不同压力的氮气。通过需求分析,配气台需提供 0~35MPa、0~1MPa 可调的高低组合氮气,设计配气台的气路原理:外接气源通过增压泵、空气泵的增压稳压介入配气台内部,经空气过滤器、截止阀、减压器,最终输出 0~1MPa 的低压气。气路传输过程设置高压气、中压气分支输出,并配有压力显示表,实时显示各路气压值。

3.2.2 加注罐设计

加注罐是煤油存贮和中转加注的压力容器,其结构集成了罐体、升降机构、电子秤、阀门如图 3 所示。电子秤用于记录和显示加注燃油的质量,升降机构用于加注罐的顶升控制,方便电子秤移动。罐体设计为上下圆弧面,中间圆柱体,此结构承压能力强,排油残留小。罐体上表面设置 4 路阀门,分别连接气路加注、燃油加注/转注、排气、压力表连通管路。

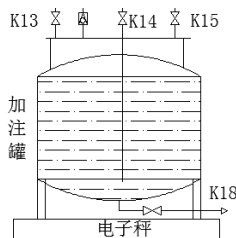


图 3 加注罐示意图

3.3 定量排挤管路系统设计

定量排油系统包含主排油管路、特性参数显示仪表两部分。主排油管路与贮箱油囊相连,控制排油量的大小,可模拟燃油增压输送系统输入排油压力与排

油流量的线性关系。特性参数显示仪表包括气瓶压力表、油囊排挤压力表、排油输出压力表、燃油流量表,可直观感知特性参数数值。

应远程数据采集和安全试验需要,本设计选用的压力表均含有 485 通信接口,可采用总线控制方式,减少传输导线之间的电磁干扰,提高数据读取可靠性同时燃油流量控制采用手动调节型球阀和电动调节型球阀两种并联控制方式。非振动环境下,采用手动球阀控制方式,人工读取仪表数值。振动环境下,煤油排挤与高压气瓶均存在安全隐患,可通过电动球阀实现远程控制,提高试验的安全性。

3.4 监测与控制系统设计

监测与控制系统是试验平台人机交互最直接的体现,既能实时显示关键部位参数变化,又能控制加注排挤系统试验的参数动态调节,是试验平台顺利运行的核心^[5-6]。根据试验平台和加注排挤试验的需求,检测与控制系统总体架构如图 4 所示。

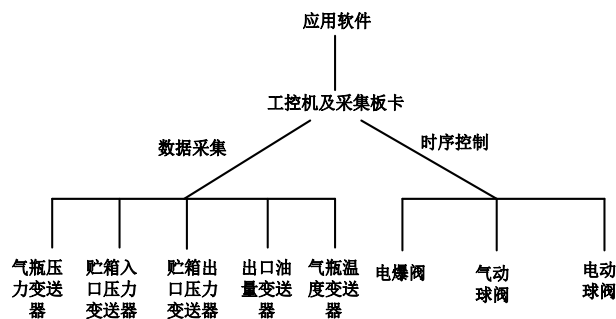


图 4 检测与控制系统架构图

监测与控制系统由应用软件、控制器硬件、采集仪表、阀门等构成。压力变送器、流量变送器、温度变送器等传感部件采集贮箱的参数状态,经控制器硬件模块的信号放大、滤波、整形处理,应用软件通过调用处理程序,以一定的图形、曲线形式显示出来。

3.4.1 采集仪表选型

采集仪表是系统监测状态参数的主要途径,主要包括压力变送器、流量变送器、温度变送器等。考虑到试验数据传输稳定性、试验安全性,仪表需选用带有远程通信功能的集成模块,并且能够适应煤油介质,具有耐腐蚀、防爆特性。3 个压力传感器的型号分别为 BP8103G-0.5/35MPa、BP8103G-0.5/0.6MPa、BP8103G-0.5/0.6MPa,流量传感器型号为 LW-25D2M3SDSR,温度传感器选用贴片式热电偶,仪表全部采用 485 通信接口,满足了压力 0~35MPa、流量 2L/s、温度 -40~80℃ 的范围且远程通信要求。

3.4.2 阀门选型

阀门是启动排油气源、调节增压输送流量的主要部件,是摸索排油特性的重要执行部件,其控制精度直接影响排油控制时序的选择。本系统阀门包括电爆阀、气动球阀、电动球阀。时序控制时,控制系统顺序点爆电爆阀、气动球阀,并以一定的加载形式控制电动球阀的开度,调节排油流量。

电爆阀与高压气瓶三通相连,能否可靠点爆是排油系统启动的关键,本设计采用24V供电,点爆电流可达10A,保证电爆阀中的火工品能够快速点爆。气动球阀是排油出口的关键部件,本设计选用成熟产品XJ/Q02-23/32-DQ,24V供电,毫安级驱动电流,响应速度可达20ms。电动球阀是为满足振动试验条件下的安全操作而设置的,它具有防爆、抗震、耐腐蚀的特性,供电电压24V,控制形式为485通信,抗干扰能力强。

3.4.3 控制器硬件选型

仪器仪表及阀门控制形式有485通信、数字I/O两种。本系统选用成熟通信模块、I/O模块。

通信模块选用MOXA公司通用串口通信模块CP-118U-I模块,它是一款智能型8口Universal PCI多串口卡,是为POS和ATM应用而设计的,可以用于工业自动化系统制造和系统集成上。可兼容任何主流操作系统,CP-118U-I的8个RS-232/422/485串口的每个端口数据速率达921.6Kbps,提供全调制解调器控制信号,确保与外围串口设备的兼容性。

I/O模块选用PCI9054,可以输出一定脉宽脉冲信号,并具有一定的驱动能力,用于驱动阀门,驱动阀门的信号采用OC方式输出,通过上拉使电压输出到预定的电平;具有2路OC的输出(每个阀门信号),一路为用作电爆阀信号(秒脉冲),一路为电磁阀信号,可以调节输出的驱动脉冲的间隔脉宽,设置范围为0.1~10s,精度优于1ms;

4 验证与分析

实现燃油加注、排挤是本试验平台搭建的主要目的。为验证试验平台方案的应用可行性,本设计以水为加注介质进行了抽真空加注、排挤试验验证。试验开始前,加注罐内已加注200kg水,试验管路连接正常。

4.1 加注试验

试验状态:贮箱水平放置;试验项目:抽真空自

检、抽真空加注。

4.1.1 抽真空自检

a. 关闭K19、K16,打开K20、K21、K22,启动真空泵对气腔和液腔抽真空至100Pa以下,关闭K22,再关闭真空泵;

b. 保压2h,观察数显仪,要求仍能够维持100Pa以下,记录抽真空时间。重复进行3次试验。

4.1.2 抽真空加注

a. 打开阀门K16,打开配气台K11,向加注罐缓慢供气0.05~0.08MPa;

b. 通过监测加注贮罐下电子秤质量变化,控制球阀K16的开度,初始加注流量为0.3kg/min,每间隔0.5分钟将加注流量调大0.2~0.3kg/min,当加注流量达到2kg/min后,将加注贮罐压力增大至0.12MPa,并将K16开度缓慢增大,使得加注流量为15~20kg/min;

c. 当电子秤减少质量为100kg时,将K16开度调小,使得加注流量为2kg/min;

d. 当电子秤减少质量为145kg时,将K16开度进一步调小,使得加注流量为0.3kg/min;

e. 当电子秤减少质量为150kg时,停止加注,记录此时电子秤数值及机身舱重量,关闭数据采集系统;

f. 关闭真空泵、阀门K22,停止气腔抽真空,关闭配气台K11,停止挤压加注罐;

g. 断开与加注阀连接的管路,打开K19、K9、K15,通过配气台对加注管路进行吹除;

h. 当加注罐电子秤不再改变时,记录此时电子秤数值,关闭K9停止吹除,并拆除抽真空设备。

4.1.3 试验分析

如图6所示,在三次加注试验中,加注罐内的水均被配气台通过抽真空管路输送到贮箱中,加注过程加注罐的质量变化平稳,无质量突变情况。这表明,配气台工作正常,加注管路气密性、抽真空设计满足设计要求,抽真空加注试验方案可行。

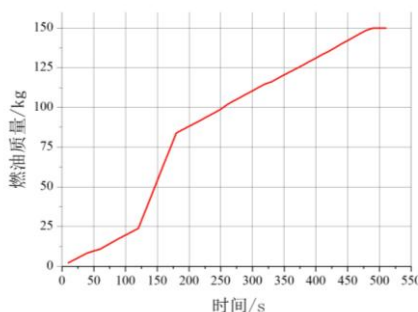


图6 燃油加注质量与时间关系图

(下转至第39页)