

主燃烧室燃油总管试验器研制

The Development of Combustor Fuel Manifold Test Rig

钟山 刘永丽 郭巍 杨灵 / 中国燃气涡轮研究院

摘 要:介绍了用于测量带喷嘴环形燃烧室的燃油总管流量特性及流量分布和雾化状况的总管试验器。试验证明,该试验器可排除各喷嘴间的不均匀性,为燃烧室部件的试验研究提供可靠的保障。试验器可达到设计指标,试验数据准确可靠。

关键词:总管试验器;燃油系统;试验台架;自动控制

Keywords: fuel manifold test rig; fuel system; test rig; automaticly control

0 引言

燃烧室是发动机的重要部件之一,燃烧室出口温度分布品质对涡轮工作的可靠性有着重要的影响。实践证明,燃烧室燃油总管喷嘴流量分布均匀性是影响燃烧室出口温度分布的主要因素之一。在发动机研制阶段,需开展大量的燃烧室试验和发动机整机试验。在燃烧室试

验前和整机装配前,均需对总管喷嘴流量分布的均匀性进行检查和调试。

设计参考国内同类型试验器的试验能力,确定系统的主要功能及设计技术指标,满足发动机燃油总管流量分布及单喷嘴喷雾情况检测供油所需,同时还可作为其他试验的供油。变频控制的引入,系统的工艺方案、数据采集方案

的优化,增强了整个系统的试验功能,解决了以往油路设计的缺陷。试验器最大的特点是高精度控制的宽流量范围0~15000kg/h、宽压力范围0.04~8.0MPa、高测量精度 $\pm 0.1\%$ 或 $\pm 0.5\%$ 。

1 设计目的与主要技术指标

1.1 设计目的

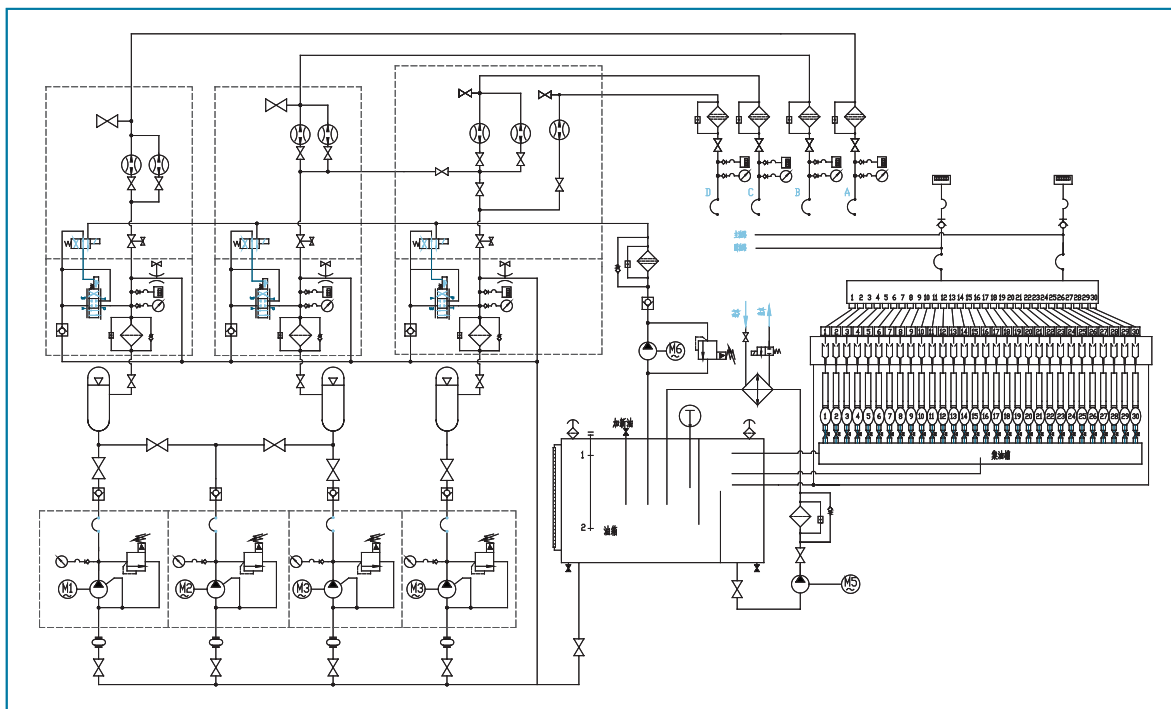


图1 总管试验器原理图

燃油总管试验器的设计主要基于燃油总管及喷嘴工作情况的试验研究,主要目的是对环形燃烧室的带喷嘴的燃油总管流量特性以及喷嘴的流量分布和雾化进行测量,排除各喷嘴之间的不均性,为燃烧室部件的试验研究提供可靠和有力的保障。

1.2 主要技术指标

依据多种型号发动机燃烧室燃油总管试验技术要求,确定总管试验器技术指标为最大供油压力、最大供油流量和燃油总管喷嘴数。

燃油总管试验设备主要由燃油系统、总管试验台架(含单喷嘴雾化检测装置)、测量/控制系统(含监控系统)、电气系统(含操纵台)等4部分组成,设备原理图如图1所示。其中,燃油系统由4条不同流量范围的油路组成,通过4条油路的选择组合可实现不同燃油流量主副油路的同时供给;总管试验台架由流量分布检测装置和单喷嘴雾化检测装置组成,可进行总管流量特性与单喷嘴流量特性及雾化情况的观测;测量/控制系统由5000IMP分布式测量系统与PLC工业控制系统组成,可实现试验状态的自动控制以及试验数据的自动录取和计算。油路流程为:油箱—油泵—缓冲器—过滤器—调节—测量—供油,进入总管试验台架后由总管上多支喷嘴喷出,经每支喷嘴出口的收集器收集,并由称重传感器称量,数据传入计算机计算并分析总管喷嘴的流量分布特性;其中一路供入燃油喷嘴,在雾化检测装置中自然喷射,通过DDC照相系统成像,分析喷嘴的雾化情况。

2 燃油系统

2.1 系统原理

为完全满足发动机试验用燃油总管流量分布校准及单喷嘴喷雾情况检

测,根据4种试验喷嘴设计及试验参数的要求,油路优化设计为4条,采用“或非门”控制油泵组。试验中可根据试验器总管主副油路和单管流量需要,选择使用油泵数量。对每条油路供油时,先使用变频器设置总供油量达需用油量的1.2倍左右,用变频和伺服阀联合控制流量,使出口流量和压力达到要求,这样回油量小,油路温升小,油箱循环冷却系统还可实现回油冷却。

燃油系统主要由油泵、缓冲器、过滤器、电液伺服阀、液体压力变送器、温度变送器、压力表、质量流量计、涡轮流量计、阀门、油管、油箱等组成。为保证喷嘴在主副油路同时或单嘴油路工作时互不影响,配备4台供油泵4个出口。油路状态参数见表1。

2.2 功能特点

1) 满足发动机试验用单喷嘴喷雾情况检测及燃油总管流量分布校准,满足其他适用压力、流量试验设备的供油。

2) 油路系统要求宽流量范围、宽压力范围、高精度控油,可实现全自动控制。

3) 油泵组采用“或非门”控制,实现双泵并行供油。采用变频控制油泵电机,实现油泵软启动,油量粗调,油路流量调节性好、范围宽;同时采用具有线性好、高精度的电液伺服阀作精确控制,调节精度高。

4) 整个油路采用循环供油方式,解决了以往总管试验的高耗油、高试验

成本的问题。在油路使用低调节量情况下,通过燃油冷却系统可实现回油冷却,以便大流量循环使用。

5) 配有先导油压供给系统,保证电液伺服阀的低压控制。

2.3 主要部件选取

根据4条供油油路 and 不同控制元件的需要,系统选用了1.6MPa 和16MPa的5种型号的球阀,以及5种5 μm 和10 μm燃油过滤器。

1) 柱塞泵组

要求柱塞泵泄漏量小,吸油口最小绝对压力0.08MPa,出口油压高并稳定。柱塞泵组包括柱塞油泵、变频防爆电机、变频器、弹性联轴器、双法兰座和组装调整装置、单向阀、安全阀、泵进出口软管及接头组件等。

2) 电液伺服阀

要求电液伺服阀能在NAS8级下正常使用;可通过200 μm内的污染颗粒;分辨率0.25%可实现高精度控制;即使阀被堵塞时,阀心能自动复零,不会产生负载全开或全关的错误“满舵”现象;力矩马达采用整体焊接工艺,结构牢固,能在恶劣工况环境下工作;阀心的驱动力大,不容易被卡死,适用压力范围广。

因常规伺服阀最低使用压力为0.5MPa,为解决低压供油(最低油压0.04MPa)情况,伺服阀采用油口外供内排方式,由一套供油系统单独给伺服阀供油,以提供阀的开启压力,保证正常

表1 油路参数

油路	油泵供油数量	供油量(kg/h)	最高油压(MPa)	流量计测量范围(kg/h)
A	两台或一台7500kg/h油泵	1500~15000	8.0	涡轮流量计1240~7750 涡轮流量计2325~15500
B	一台2500kg/h油泵 或一台7500kg/h油泵	250~2500 750~3500	8.0	涡轮流量计155~930 涡轮流量计465~3100
C	一台500kg/h油泵 或一台2500kg/h油泵	50~500 250~1000	8.0	涡轮流量计测量范围465~3100 质量流量计测量范围0~1000
D	一台500kg/h油泵	1.8~180	8.0	质量流量计测量范围0~250

地调节油路流量。

3) 质量流量计和涡轮流量计

具有测量精确度高(质量流量计基本误差 $\pm 0.1\%$ 、涡轮流量计 $\pm 0.5\%$)，重复性好，适用范围广，输出脉冲频率信号适用于计量和与计算机连接，无零点漂移，抗干扰能力强，范围度宽，结构紧凑轻巧、安装维护方便、流通能力大，适用于多种介质等功能。

3 总管试验台架(含单喷嘴雾化试验台架)

总管台架由总管流量分布试验装置和雾化试验装置组成。为保证试验器的多功能性，总管安装平台在保证主体结构合理的基础上，将总管连接处设计为易拆卸型。

3.1 系统方案

总管流量分布试验装置由燃油称重装置、圆形固定盘、圆形旋转盘、总管立式可拆卸模块、二维执行机构等组成。雾化试验装置由照相装置和安装台架组成。具体设计方案如下：

称重装置由燃油容器、称重装置和电磁阀组成。试验过程中，通过称重装置测量每个喷嘴在相同时间内的油量，计算得出单个喷嘴流量。燃油容器的高度可调节，底部安装电磁阀。通过对电磁阀的控制实现接油/放油控制。燃油容器设计体积 0.025m^3 可满足单个喷嘴最大状态点接油2min。称重装置由称重平台和称重传感器组成，为满足多个喷嘴，多种流量范围的测量，选用高精度、可变量程(量程 $0\sim 25\text{kg}$ 可调)的称重传感器。

可拆卸式固定盘下面与燃油称重装置中的燃油容器相连，上面与旋转盘连接，将需称量的煤油和调节状态的煤油分开。旋转盘通过转动将需称量的煤油导入可拆卸固定盘的接油口，用于固定燃油总管，并将每个喷嘴与旋转盘接

油口连接。总管立式可拆卸模块可使燃油总管处于直立状态。

二维执行机构，确保旋转盘瞬间短距转动。

单喷嘴雾化试验台架由照相装置、光源、照相机和安装台架组成。为了记录同一喷嘴不同角度的喷雾锥角，安装台架设计为可旋转式。

3.2 功能特点

1) 总管试验台架用来进行燃油总管流量分布试验及单喷嘴雾化试验。进行燃油总管流量分布试验时能确保每个喷嘴都同时实时计量，进行单喷嘴雾化试验时能将喷嘴在各种喷雾状态下的雾化角度清晰记录。燃油总管在试验台架上可做到水平及垂直安装，有一定的扩展性(满足环形、矩形、扇型燃烧室燃油总管试验)。

2) 采用双支点力平衡方式，克服受力不均带来的称重误差。油桶计量采用质量称重方式，称重范围宽、准确，称重传感器量程可调，基本误差 $\pm 0.1\%$ 。

3) 二维执行机构动作时间不大于 0.01s ，延时可通过测控系统补偿，确保总管上所有喷嘴计量与计时的同步。

4) 试验器台架设计为可旋转结构，能拍摄到喷嘴周向 360° (全向)的雾化角度；对喷雾进行实时拍摄，并能对喷雾图像进行处理。背景光的应用和软件处理模糊图像识别系统，避免了成像质量差和角度判别有误差。

5) 燃油容器设计体积满足单个喷嘴最大状态点接油2min(容器内煤油 $< 20\text{kg}$)及喷嘴最小状态接油10 min(容器内煤油 $> 2\text{kg}$)，燃油容器结构采用分段式。电磁阀可实现零压启动、防爆、无泄露、通电持续工作时间不少于10min。

4 测控系统

测试及采集参数主要有燃油压力、

温度及流量、质量和涡轮流量计频率、称重数据、燃油流量、压力、温度、油泵转速及油箱液位等，控制包括试验数据的稳/瞬态实时采集、记录、分析、处理、制表、制图、报警和显示。

采用可编程逻辑控制器PLC和上位控制计算机为主的结构方式。系统具有多种保障试验安全的控制手段，能够以自动方式运行，同时具有手动方式的操作和控制功能。通过人机视频交互，选择需用油路，输入流量、压力、使用时间等参数，系统即可在程序控制下达到设置参数要求。

控制系统由试验状态控制和喷嘴雾化监控两部分组成，试验状态控制参数主要由油泵电机变频控制、油路电液伺服阀控制、电磁阀控制和应急系统等控制。喷嘴雾化监控主要由彩色一体化摄像机、室内全方位云台、硬盘录像系统等组成。

5 调试试验及结果

调试包括对系统器件的单个调试和系统整体调试，考核选用器件运行性能及状态是否良好；在设计流量、压力范围内进行调试试验。最后，用型号燃油总管喷嘴流量分布校准及单喷嘴流量分布校准试验，确定系统的功能能否达到试验要求。

在试验器中选用需用的油路及主副油路的供油流量和压力；用PLC自动控制供油泵组和电液伺服阀，使燃油供油参数与供油泵组参数转速跟随，使出口气流量、压力在程序控制下达到使用要求。伺服阀和油泵参数控制线性接近1，电液伺服阀调控精度为 $\pm 0.1\sim 0.5\%$ ，油泵变频调控精度为 $\pm 0.5\%$ 。

试验台架单个称重装置在 $0\sim 25\text{kg}$ 范围内精度为 $\pm 0.1\%$ 。

燃油总管试验检测，使用在研型

无人机自主空中加油技术探究

Research on UAV Autonomous Air Refueling Technology

蒋红岩 李文川 肖铭 / 南京机电液压工程研究中心

摘要: 作为提高无人机作战效能的有效手段, 无人机自主空中加油技术近年来已成为了无人机研究领域的重要发展方向。本文在总结国外无人机自主空中加油技术发展的基础上, 指出了基于“插头-锥管”的无人机自主空中加油的关键技术和发展方向, 对于研究无人机空中加油技术具有一定的借鉴意义。

关键词: 空中加油; 无人机; 插头-锥管

Keywords: air refueling; UAV; probe-drogue

0 引言

在现代军事活动中, 无人机在重要目标定位、敌方位置记录、摧毁战略目标或非法地面系统等方面发挥着重要的作用。而由于携带燃油量的限制, 严重制约了其航行距离和起飞重量, 以及战略部署。为了克服这些困难, 美国等国家纷纷开始研究无人机自主空中加油技术。以“全球鹰”无人机为例, 据诺格公司称, 空中加油技术可将其续航时间从现在的50小时延长到150小时, 航

程提高3倍, 单架次飞行的作战效能也得到了成倍的提升。另外, 自主式空中加油技术不仅能提高无人机的作战效能, 对于帮助疲劳的飞行员或在恶劣天气飞行的有人驾驶飞机同样具有实用价值。

目前世界上有两种空中加油方式, 即美国空军使用的“伸缩套管式”和美国海军及其他国家(包括中国空军)使用的“插头-锥管式”。伸缩套管式是在加油机中设置一个空中加油操作员,

该操作员控制伸缩管上的加油接头与受油机受油插座对接。在这种加油方式中, 受油机的任务是保持与加油机的相对位置。在插头-锥管式加油方式中, 加油机拖曳一根后部带有锥套的软管, 由受油机飞行员控制受油插头进入锥套, 加油机上不需要有加油操作员。从研究角度来说, 因为伸缩套管式加油方式对受油机要求小, 更容易实现“有人机-无人机”空中加油, 但要发展“无人机-无人机”空中加油, 伸缩套管式的优势并

号总管进行调试试验, 总管重复性检测结果为所有喷嘴的相对流量偏差小于0.5%, 总管流量-压力特性检测结果为压差开方与相对流量线性接近1。

单喷嘴喷雾情况检测, 通过采用平行光源及深色背景可使拍摄到的喷嘴雾化角度清晰可见。

6 结论

经试验证明, 该系统设计原理正确, 方案可行, 结构合理。总管试验器满足发动机燃油总管流量分布校准及单喷嘴喷雾情况检测要求。由于采用了

PLC控制的变频电机控制供油系统, 加上电液伺服阀作为流量微调, 使油路更具柔性, 具备了国内同类设备的先进水平。系统技术指标、运行程序均满足设计目标, 领先于国内同类设备, 而且能够减少试验人力成本、缩短试验时间、节约耗油成本, 今后必将在完成各种发动机的试验中发挥重要作用, 并为发动机型号研制做出贡献。

AST

参考文献

[1] 机械设计手册(第2版). 机械工业出版社, 2000.

[2] 压力容器设计手册. 化学工业出版社, 2006.

[3] 航空发动机设计手册. 航空工业出版社, 2001.

[4] 中国航空材料手册. 中国标准出版社, 2002.

[5] 王绍俊. 机械制造工艺设计手册. 机械工业出版社, 1985.

作者简介: 钟山, 高级工程师, 主要从事试验件、试验设备和非航产品等设计。