

航空发动机高空台的发展与展望

Development and Prospect of the Aero-Engine Altitude Test Facility

侯敏杰 刘冬根 / 航空发动机高空模拟航空科技重点实验室

导读:功能完备和技术先进的高空台是发展完善、耐久、可靠的高性能航空发动机的关键试验平台。我国高空台的设备能力与技术水平居亚洲第一、世界第五,在我国多型在研、在役航空涡喷、涡扇、涡轴发动机研制中发挥了重要作用。本文分析了高空台与高空模拟试验技术的发展现状,探讨了我国高空台建设和高空模拟试验技术研究的发展方向。

关键词: 航空发动机; 高空台; 试验

Keywords: aero-engine; altitude test facility; test

0 引言

航空发动机的气动热力学问题、机械系统问题、匹配性问题及控制规律问题等都必须通过高空台模拟试验进行充分的调试、验证。高空台是能在地面模拟航空发动机的空中工作环境条件,并获取发动机高空性能/特性的大型试验设备,是先进航空发动机自主研制必不可少的一种关键设备。一个没有高空台的国家,是不可能独立自主地研制出先进高性能航空发动机的。随着我国航空工业的蓬勃发展,对高空台的试验能力和高空模拟试验技术都提出了更高的要求。

1 高空台的战略地位与重要作用

高空台是国家战略性资源,高空模拟是自主研制先进航空发动机必不可少的重要手段和工具,一个国家的高空模拟能力和技术水平已成为该国自主研制先进航空发动机能力和水平的一个重要标志。

1.1 高空台是先进航空发动机研制不可或缺的重要手段和工具

航空动力是集合了复杂气动、热力、结构和控制的高技术产品。由于航空动力技术的复杂性和研制的高风险性,特别是工作范围的不断扩大和设计指标的日益提高,包括概念研究在内的航空动力发展的每一个环节都离不开广泛而深入的研究与试验。目前,航空涡喷/涡扇发动机的飞行高度已达25~30km、最大飞行速度已达2.5~3.0倍声速,而且对机动性的要求也愈来愈高。这不仅使发动机的工作

参数随飞行条件变化而急剧改变,而且发动机的部件性能、工作稳定性、共同工作特性、燃烧特性等也明显地受到飞行条件变化的影响。特别是高空低速、高空高速和低空高速条件下的发动机工作特性,已经与地面状态的性能大不相同,不能仅靠普通地面试车台上的台架试验结果通过传统的相似换算方法得到,而必须通过模拟真实空中工作环境条件下的试验来确定。另外,空中风车起动特性、燃烧

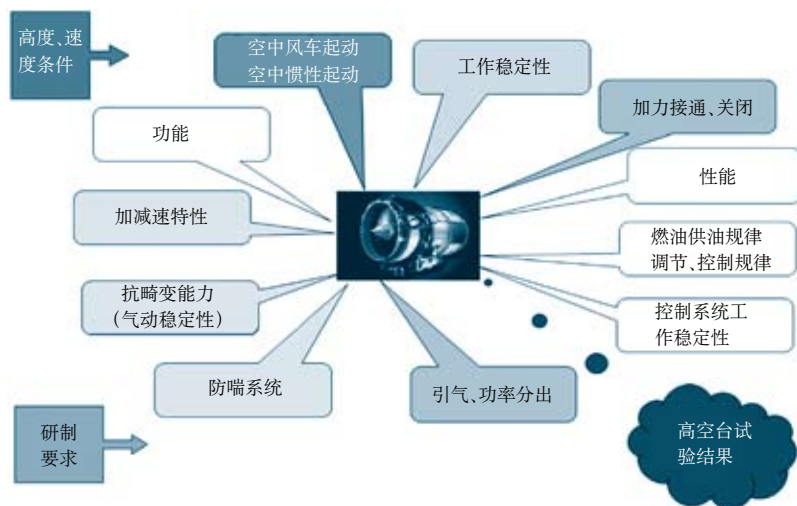


图1 航空发动机高空模拟试验

室的稳定燃烧特性和点火特性、低雷诺数条件下的发动机工作稳定性等试验,在地面台上难以做到,需要在高空台上进行。据统计,一种新型发动机研制,需要占用3~4个高空舱,进行2000~4000小时甚至更多的高空模拟试验。

航空发动机需要在高空模拟试车台上验证及解决的问题可分为:气动热力学、机械系统、匹配性和控制规律等四大类。在整机试验中,各种问题的耦合使航空发动机高空模拟试验更具复杂性。在高空台上调试、验证、探索发动机改进改型方案须有详细的部件特性的支持,以及整机仿真技术的支持,才能有效地提高高空模拟试验结果的置信度,而且整机仿真技术可以弥补高空台的试验缺陷或不足。

在新型发动机的研制过程中,航空发动机高空模拟试验很重要,其相关的高空模拟试验技术支撑则更重要。通过合理、充分地安排航空发动机高空台试验,能够优化各部件空中匹配性能,确定空中工作包线,并大幅降低试验经费、大大缩短研发周期。高空台作为重要的获取空中工作参数以验证发动机部件匹配性能的地面设备,集设计、制造工艺、控制、测试、试验等多项工业技术和发动机技术于一身,具有不可替代的地位。

1.2 高空模拟试验是航空发动机性能调试与技术攻关的最有效途径

航空发动机研制是一个设计与试验的反复迭代过程。一台新型发动机的研制需要数千小时的空中性能调试试验。理论上说,该试验既可以在高空台上进行,也可以在飞行台上进行,还可以直接在原型飞机上进行飞行试验。但最有效的调试手段是高空

台试验。首先,从飞机及其发动机的研制来看,通常要优先启动发动机的研究工作,因而新型发动机的研制过程中没有原型飞机可用。即使是飞机型号牵引主导的发动机研制项目,也不会有成熟可靠的原型机来进行高空性能调试试验。其次,用运输机或轰炸机改装的飞行台是发动机研制中的重要调试手段之一,但一般仅限于飞行高度低于11km、飞行马赫数一般低于0.85的范围;飞行台远不能满足飞行高度为25~30km、飞行速度为2.5~3.0倍声速的高性能发动机的性能调试需求。再者,地面高空模拟试验相对于空中飞行试验而言,参数测试能力、试验安全性和试验条件控制方面具有独特的优势,对发动机性能调试与技术攻关也非常关键。英国人曾统计过,发动机高空台性能试验一个月的工作量,相当于飞行试验300次起降,而高空模拟试验的每小时费用约为飞行试验费用的1/30~1/6。

1.3 先进航空发动机的关键部件研发需要进行深入的高空模拟试验

不仅在航空发动机的研制过程中

需要大量的整机高空模拟试验,而且其部件的研发也要依赖于高空台,例如,加力燃烧室和核心机的研发通常就需要在高空台上进行大量的研究试验。因为对于关键部件的高空特性,不能仅通过理论计算和普通试验来解决,而建设专门的高空试验设备,其投资基本与一座高空台相当,因而通常会将此类试验安排在高空台上进行。据国外经验介绍,成功地发展一个高性能的加力燃烧室,一般要在高空飞行状态下进行2000小时左右的全尺寸加力燃烧室试验。

1.4 航空发动机先进设计方法的有效性验证与新型航空动力研究都离不开高空试验

当前,虚拟设计方法与仿真试验技术在优化试验方案和缩短试验周期方面取得了较好的效果,但这些先进方法和技术的开发与升级离不开大量的试验结果的支持,其有效性和应用范围的验证也离不开真实工作环境条件下的试验验证。

为了满足飞机技术指标不断提升的要求,当前非传统新型航空动力的



图2 高空模拟试验的重点研究领域

研发正如火如荼的进行着，尤其是飞行速度为3~5倍声速的飞行器动力的研究。而这些动力装置的研究，如用于邻近空间高超声速飞行器的涡轮冲压组合动力的研究，不仅要进行深入广泛的动力高空模拟试验，而且还要要求在考虑飞行器与动力相互作用影响下的高空模拟试验，以及飞行器与动力一体化的高空模拟试验。可以毫不夸张地说，高空模拟试验测试的技术水平与能力决定了高超声速飞行器动力研究的进程。

2 高空台的发展现状

自20世纪30年代世界首个高空台建成以来，其试验测试能力与试验测试技术随发动机发展而不断提升。当前世界上建有几个高空模拟试验研究基地，有近百个高空试验舱。

2.1 国外高空台发展现状

美国的高空台和高空舱数量占世界总数的一半以上。在高空模拟能力绝对占优的情况下，为适应进气道/发动机的相容性能问题和大涵道比涡扇发动机研制的高空性能/特性试验问题，不惜耗费6.5亿美元于20世纪80年代中后期建成了气源装机功率达450MW的巨型高空台ASTF。

俄罗斯的高空模拟试验研究中心现有两个高空模拟试验基地、5个在用高空舱。俄罗斯早在20世纪90年代就着手筹建10m直径的巨型高空舱，以适应先进航空发动机研发的高空试验需求，其设备规模和试验能力仅次于美国，是欧洲最大的航空发动机试验基地。另外，英、法等国也有较为完备的高空模拟能力。不仅如此，日本、韩国和印度等国，随着经济实力的提升和发动机的自主研发，也于上世纪末和本世纪初开始建高空台。

这些国家在不断提升高空台硬件能力的同时，更加加大对高空模拟试验技术的研究。一方面探索新的试验与测试方法，开发新的试验科目，广泛使用和融入数值仿真技术；另一方面优化资源整合，比如美国于20世纪90年代将主要的高空模拟试验基地归入阿诺德工程发展中心（AEDC），使其高空模拟设备能力和技术水平稳居世界第一。总体上说，高空模拟试验技术，已从单纯追求发动机性能的高空性能试验、功能试验阶段，发展到追求综合高性能航空发动机的性能功能试验、适用性试验、耐久性试验、数字化与仿真试验、自动化与智能化

试验等。

2.2 我国高空台发展现状

我国于1965年开始高空模拟试验基地的自主建设工作，于1995年竣工并投入使用。我国高空模拟试验基地占地400亩、总装机功率220MW，其设备能力与水平居亚洲第一、世界第五。当前有4个高空舱，其直径分别为3.7m、3.0m、3.0m和2.0m，可承担海平面标准大气静止条件下空气流量120kg/s的涡喷、涡扇、涡轴、涡桨发动机的高空模拟试验，主要包括：高空校准试验、性能试验、功能试验、功率/推力瞬变试验、加力通/断试验、进气压力畸变试验、空中起动试验、

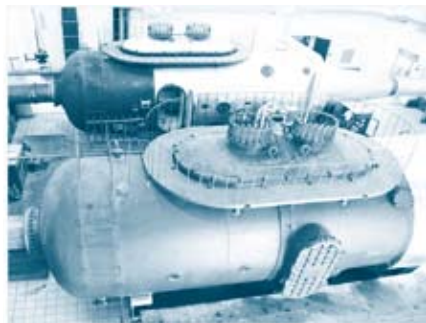


图3 高空模拟试验舱

表1 国外主要航空发动机高空模拟试车台

代号	类型	直径(m)	空气流量(kg/s)	模拟状态(km/Ma)	备注
ASTF C1	自由射流 直连接	8.5	660	30/3.8	美国 AEDC
ASTF C2	自由射流 直连接	8.5	1250	30/3.8	美国 AEDC
ETF J4	自由射流 直连接	6.1	636	25/3.2	美国 AEDC
3E	直连接	4.5	318	25/3.0	美国 NAPC
C-1A	自由射流 直接连接	5.7	1500	25/3.0	俄罗斯 CIAM
C-4N	直接连接	5.7	600	27/3.0	俄罗斯 CIAM
No.3	直接连接	6.1	272	25/2.3	英国 RAE
No.4	自由射流	3.7	272	30/3.0	英国 RAE
R5	自由射流 直连接	5	375	35/4.0	法国 CEPR
Cell 2	直接连接	3.6	140	20/2.4	德国

高空风车特性试验、进气加温加压试验、高原/高温/低温起动试验等。

高空模拟试验技术的研究与发展,源于发动机的研发需求。

我国十分重视高空模拟试验与测试方法的研究,尤其是自1997年成立航空发动机高空模拟航空科技重点实验室以来,高空模拟试验技术的水平有了显著的提升,建立并完善了涡喷发动机高空模拟试验规范,解决了涡轴发动机和大流量收扩喷管涡扇发动机高空模拟试验的关键技术难题。我国当前的高空模拟技术研究主要在性能/功能试验和适用性试验技术方面,与美、俄的同类技术相比还有差距。

3 我国高空台与高空模拟技术的发展方向

随着我国的航空发动机由测绘仿制向自主研制的转变,尤其是由航空大国向航空强国的转变,以及航空发动机重大科技专项的设立工作顺利推进,对高空模拟试验的技术和能力提出了新的要求,也为高空台的发展创造了新的机遇。

3.1 我国高空台的发展要求

为适应国内发动机研究的整机试验条件保障需求,急需开展以下几方面的高空台能力的建设工作:涡喷、涡扇发动机高空模拟试验能力建设;涡轴、涡桨发动机高空模拟试验能力建设;大涵道比发动机高空模拟试验能力建设;自由射流试验能力建设;组合动力发动机高空模拟试验能力建设;航空发动机气动稳定性综合评定试验能力建设;加力燃烧室/主燃烧室高空模拟试验能力建设;辅助动力以及其他附件高空模拟试验能力建设。

通过上述高空台能力的综合评估与建设,形成配套国内航空发动机与

邻近空间飞行器动力自主研发需要的高空模拟设备,打造国际知名、世界一流的我国高空模拟试验基地。

3.2 我国高空模拟技术的发展方向

航空发动机高空模拟航空科技重点实验室,经过15年的建设和发展,突破了多项高空模拟试验关键技术,形成了一系列较为成熟的高空模拟试验方法、测试方法与数据处理评定方法。为更好地适应当前国内航空发动机蓬勃发展和向航空强国发展的发动机高空模拟试验需要,迫切需要加大和深化以下几方面的高空台能力研究与建设工作。

1) 高空台飞行环境模拟技术

高空台进气压力/温度模拟技术;高空台排气环境模拟技术;高原、高温、低温起动环境模拟技术;进气畸变及其他特殊要求使用条件模拟技术;自由射流高空模拟试验技术。

2) 高空模拟试验测试计量技术

推力/功率测量与校准技术;燃油流量测量与校准技术;空气流量测量与校准技术;动温/动压测量与校准技术。

3) 发动机试验评定与仿真技术

发动机性能试验评定技术;发动机功能试验评定技术;发动机与高空台建模与数值仿真技术;地面台、高空台、飞行台相关性。

4) 进气道/发动机匹配试验技术

进气压力畸变试验与评定技术;进气温度畸变试验与评定技术;进气温度-压力组合畸变试验与评定技术;进气道与发动机联合试验技术;降维因子分析与试验验证技术。

通过对上述高空模拟试验关键技术的研究,形成配套国内航空动力高空模拟试验的技术和方法体系,可为国内先进航空动力的自主研发提供技

术条件保障与支持。

4 结束语

航空发动机固有的高复杂性和风险性,加之飞机战技指标不断提高,使得先进航空发动机研制仍然离不开大量试验的支持,高空台和高空模拟试验已成为当今航空发动机自主研制必不可少的重要手段和工具,并在一定程度上反映和决定着航空发动机的研制水平。为此,要真正突破飞机“心脏病”这个瓶颈,切实做好航空发动机的坚强后盾与技术后方,必须加强高空模拟试验能力建设和高空模拟试验技术研究,为我国在役、在研和预研发动机试验提供完备的技术支持。

AST

参考文献

- [1] 侯敏杰.先进航空动力崛起的基石:高空台[C].中国航空学会2007年学术年会.
- [2] 杜鹤龄.航空发动机高空模拟[C].北京:国防工业出版社,2002.
- [3] Integrated technology investment plan for aero propulsion testing at AEDC [R]. ASME-GT2007-28088.
- [4] Ground test facility implementation of a real-time turbine engine diagnostic system randall[R]. AIAA 2005-4334.

作者简介

侯敏杰,博士、研究员,航空发动机高空模拟航空科技重点实验室主任,中航工业航空发动机试验技术首席技术专家,中国燃气涡轮研究院科技委主任,长期从事航空发动机高空模拟试验技术研究工作。