

航空发动机高空模拟试验发展思考

刘大响¹, 宋子军², 刘书冬², 刘志友²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院 高空模拟技术重点实验室, 四川 绵阳 621700)

摘要: 航空发动机高空模拟试车台与高空模拟试验是支撑航空发动机自主研制不可或缺的战略资源与手段。立足于我国航空发动机高空模拟60年的发展基础与航空强国建设的新要求,探讨了当前航空发动机高空模拟面临的三大核心挑战:一是探边摸底与实战化考核对试验能力高要求带来的挑战;二是下一代与新型动力对试验技术新需求带来的挑战;三是数字化转型对传统试验模式变革带来的挑战。在此基础上,分析提炼了航空发动机高空模拟技术未来发展的主要趋势:由简单性能验证向性能底数摸清试验方向深化,从常规动力试验向新型动力试验方向拓展,从以物理试验为主向虚实融合试验方向升级,从侧重应用技术研究向强化基础理论与前瞻技术研究方向转变,从服务高空飞行器动力试验向服务低空与通用航空动力试验领域方向辐射。本文旨在分享作者对航空发动机高空模拟试验发展趋势的认识,以期高空模拟试验研究人员提供思路与参考,更好地助力我国航空发动机的高质量持续发展。

关键词: 高空模拟试验;性能底数;数字化转型;虚实融合试验;试验技术

中图分类号: V263.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2026)01-0001-09

DOI: 10.3724/j.GTER.20260001

Consideration for the development of aero-engine altitude simulation test

LIU Daxiang¹, SONG Zijun², LIU Shudong², LIU Zhiyou²

(1. Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Altitude Simulation, AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621700, China)

Abstract: Aero-engine altitude simulation test facility and test are indispensable strategic resources and means to support the independent development of aero-engines. Based on the 60-year development foundation of domestic aero-engine altitude simulation and the new requirements of building an aviation power in China, the three core challenges faced by the current development of aero-engine altitude simulation were discussed: first, the challenges brought by the high requirements for test capabilities caused by exploration and real combat assessment; second, the challenges brought by the next generation and new aviation propulsion for new demands on test technology; third, the challenges brought by digital transformation to traditional test models. On this basis, the main trends of the future development of aero-engine altitude simulation technology are analyzed and refined: deepening from simple performance verification to comprehensive performance boundary determination, expanding from conventional propulsion testing to the next generation and new aviation propulsion testing; evolving from predominantly physical testing toward integrated virtual-physical testing; shifting focus from applied technology research toward strengthening fundamental theory and forward-looking technology research;

收稿日期: 2025-12-23

基金项目: 基础加强计划项目(JWKT-2001-21); 稳定支持项目(GJCZ-0101-01)

作者简介: 刘大响(1937-), 男, 湖南祁阳人, 中国工程院院士, 中国航发集团高级顾问, 北京航空航天大学教授、博士生导师, 主持完成我国第一座高空模拟试验台建设, 荣获国家科技进步特等奖, 是我国第三、四、五代航空发动机大型自主研究计划的倡导者、组织者和主要技术负责人之一。

引用格式: 刘大响, 宋子军, 刘书冬, 等. 航空发动机高空模拟试验发展思考[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2026, 39(1): 1-9. LIU Daxiang, SONG Zijun, LIU Shudong, et al. Consideration for the development of aero-engine altitude simulation test[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2026, 39(1): 1-9.

and extending the service scope from altitude aircraft propulsion testing to the low-altitude economy and general aviation propulsion testing sectors. The purpose of this article is to share the author's understanding of the development trend of aero-engine altitude simulation testing, with a view to providing ideas and references for altitude simulation test researchers and better assisting the high-quality and sustainable development of my country's aero-engines.

Key words: altitude simulation test; performance boundaries; digital transformation; virtual reality fusion test; test technology

0 引言

航空发动机因技术复杂、高度集成和工作特殊,高性能航空发动机的研制始终离不开全面的试验支持,尤其依赖高空模拟试验。自20世纪40年代起,美、俄、英、法等国家不惜花费巨资相继建立了50多座高空模拟试车台(简称高空台),并大力发展高空模拟试验技术。20世纪50年代后,所有新研的航空发动机都是从经高空台验证再飞上蓝天的。作为航空发动机研发体系的重要基石,高空台在一代代先进航空发动机的研制、鉴定与升级改型中,持续发挥着不可或缺的重要作用^[1-2]。当前,日本、韩国与印度也在争相建设发展高空台。

作为国家重要的战略资源,经过60多年的建设与发展探索,我国高空台的总体规模和试验能力已经接近甚至比肩世界第一的美国阿诺德工程发展中心(AEDC)^[3],为我国航空发动机的自主研制和跨越发展作出了卓越贡献。当前,在高精尖科学技术应自立自强以及航空强国战略建设的大背景下,如何更好地适应和满足我国航空发动机快速发展与研发加速迭代的高空模拟试验需求,已成为高空模拟试验不得不深度思考的重大发展课题^[4]。为此,根据对高性能航空发动机发展趋势及其对高空模拟试验需求的认识,本文剖析了高空模拟试验的主要内涵与特点,探讨了当前高空模拟试验面临的挑战以及未来的发展方向,以期为我国高空模拟试验未来的发展提供借鉴和思路。

1 高空模拟试验的内涵与主要特点

航空发动机高空模拟试验包括高空台(试验平台)、高空模拟试验技术(试验理论与方法)和高空模拟试验任务(试验活动)。其中,高空台是物质基础,试验技术是灵魂,试验任务是目的和方向。高空台是在地面模拟发动机在空中飞行时的高度、速度及进口流场畸变条件,并研究发动机空中工作性能与特性的地面试验设备。在高空台上开展的研究发动

机空中工作情况或验证其是否满足相关设计要求的活动即为高空模拟试验。与高空模拟试验活动过程和质量相关的理论、方法、测试与标准等则属于高空模拟试验技术的范畴。

高空台主要包括:安装发动机的高空舱、模拟飞行高度-速度条件的发动机进气总温总压调控系统和模拟高空飞行环境的舱压调控系统;为生成发动机不同高度-速度对应进气总温总压以及流量的加温系统、降温系统、空气净化系统、气源供气系统、气管网系统;为实现空中飞行高度环境对应舱压模拟的排气冷却系统、软化水供应与循环系统、气源抽气系统、自然水供应与冷却系统以及气源压缩机专用供电系统;与地面台功能相同但更为复杂和强大的试车工艺系统、测试系统、安全监视系统、电气系统、燃油供应系统、消防系统、大气进气系统、直排大气系统等。高空台的工作原理如图1所示。

高空模拟试验时,通过对以上系统的不同匹配组合,即可模拟发动机空中不同飞行高度-速度下进排气环境条件(进气总温、总压、流量、畸变等和舱内排气环境压力)、引气与功率分出使用环境条件(液压加载、电机加载、燃油加载等)和功率状态(不同稳态、瞬态等),从而实现准确模拟、再现和评估发动机空中工作过程及特性。由于高空台位于地面和其系统功能的完备性,航空发动机高空模拟试验具有以下特点:

(1) 试验条件的主控性和重复性强。高空模拟试验受天气和自然环境的约束极小,在设备能力范围内可以随时随地构建发动机的飞行、使用与工作条件;而且还可在需要时重复构建相同的试验条件。这对发动机的技术验证、疑难问题分析和研制进程加快等具有重要意义。

(2) 试验范围的全面性和特殊性好。目前,只有高空台能够通过实装试验来研究航空发动机的全包线工作特性。其可以模拟航空发动机在空中、地面高/低温环境和高原环境的工作状态。此外,一些

特殊的发动机试验要求,如空中零表速工作特性试验、高空低雷诺数影响特性试验等,基本只能通过高空台来实现。

(3) 参数测试的广泛性和准确性。相对于全包线范围,航空发动机工作条件恶劣且变化幅度大,而设计偏离相对较大或必须借助试验验证的主要工况在空中,尤其是高空小表速和大表速以及低功率状态条件下的工况。因此,高空模拟试验必须对多种参数开展准确、详细测试。通常情况下,高空台配置的稳态参数测试通道为2 000~3 000个,甚至可超过5 000个;动态参数测试通道为200~300个,甚至更多。高空台的参数测试不确定度与地面台的相当,其测试参数的类型、数量及其不确定度较飞行台和飞行试验具有显著优势。

(4) 试验的性价比和安全性高。据英国研究人员统计,一个高空舱两周的试验内容,等效于300架

次飞行试验的工作量。同时,高空模拟试验的小时直接费用也比飞行试验的低,且飞行试验不易遭遇或找到适宜的大气条件,如发动机结冰防冰试验环境难以寻找。对于试验安全性而言,高空模拟试验是在地面进行的,其试验风险可控性优于飞行试验。这一优势对于新研制或成熟度相对不高的发动机更加重要。

当然,高空模拟试验的组织指挥和运行维护要求高也是一个重要特点。综上所述可以看出,高空模拟试验具有全包线、全工况、全天候的“三全”显著特点,即高空台能够模拟与研究航空发动机全包线、全工况、全天候工作特性乃至其性能底数。当前,世界航空强国均建有与其发动机研发水平相应的高空台,构成了其航空发动机研发体系的核心能力。美国和俄罗斯的典型高空模拟试验舱如图2所示。

表1从模拟范围与试验能力两方面直观比较了

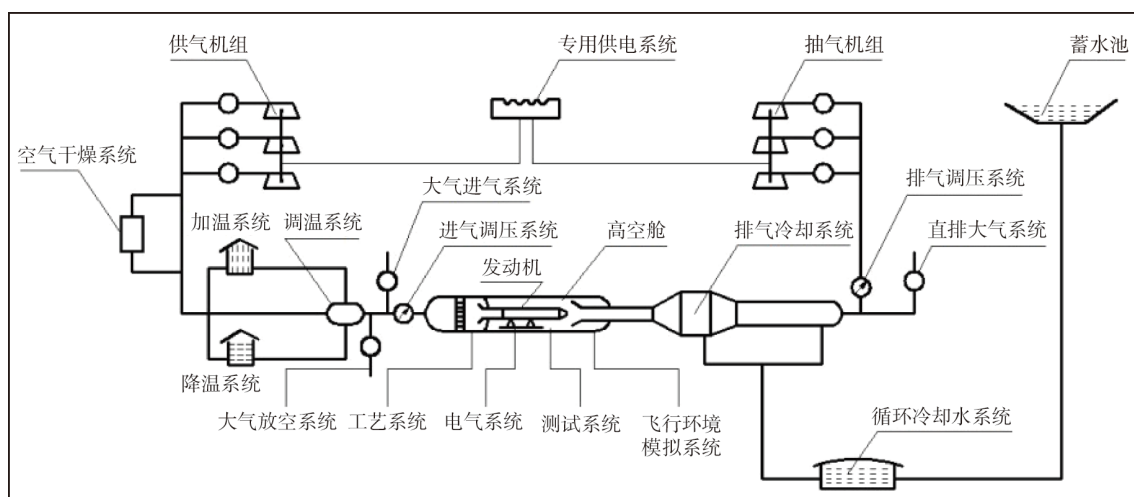
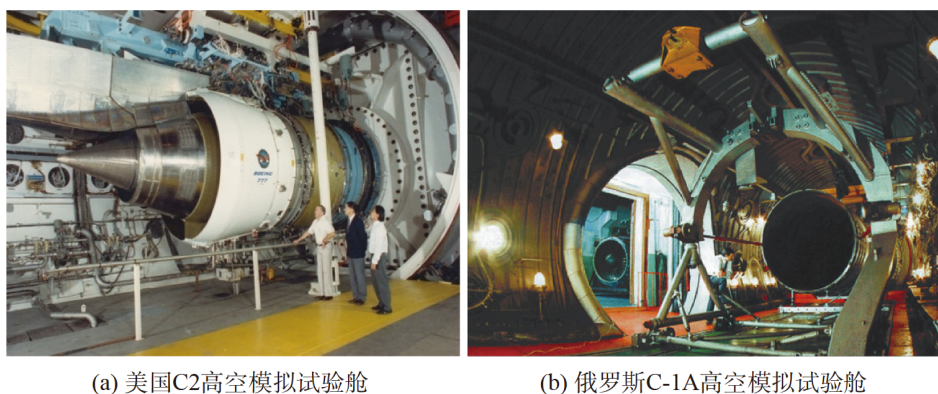


图1 高空模拟试车台工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the operational principle for an altitude simulation test facility



(a) 美国C2高空模拟试验舱

(b) 俄罗斯C-1A高空模拟试验舱

图2 典型高空模拟试验舱

Fig.2 Typical altitude simulation test cells

世界主要国家航空发动机高空台的综合能力^[5]。可以看出,无论从模拟范围、核心试验能力,还是从高空舱数量规模看,美国的高空模拟试验能力处于世界前列,中国和俄罗斯紧随其后。这也相应地证明了一个国家的高空模拟试验能力和试验技术已成为该国自主研制先进航空发动机能力和水平的重要标志。

2 高空模拟试验的作用与主要任务

高空模拟试验在航空发动机研发中的重要作用,主要表现在以下4个方面:

(1) 是航空发动机工程研制中必不可少的重要调试手段。随着飞机使用包线的不断扩大和任务需求的不断拓展,“飞行”对发动机的影响日益显著且难以准确预估。地面台试验不能有效表征这一影响,而初期的飞行试验存在巨大的风险隐患。因此,需要开展高空模拟试验来验证和优化研制方案。

(2) 是航空发动机性能鉴定与适航认证的重要试验方式。军用发动机通用规范明确规定了初始飞行前和设计定型(现称性能鉴定)阶段必须包含高空模拟试验内容;民用发动机适航规定中也有高空模拟试验的相关内容^[6]。

(3) 是化解航空发动机科研飞行试验风险以及重现、排除使用故障的重要平台。

(4) 是航空发动机新技术探索与数字化技术应用的重要工具。

根据美国国防部和NASA联合申明,一型典型战斗机发动机研制需要进行2 000~4 000 h的高空模拟试验,足可以看出高空模拟试验的重要作用 and 关键地位。

高空模拟试验的主要特点和重要作用,决定了高空模拟试验有以下4个方面主要任务:

(1) 为航空发动机产品研发和能力提升做好高空模拟试验支撑与服务。即要围绕发动机技术预先研究、工程研制方案优化、技术攻关与科研试飞等的高空模拟试验需求,根据技术验证与型号研制的需要,做好不同科目、不同要求的高空模拟试验,从而促进发动机产品的快速设计迭代与使用交付。这是高空模拟的首要任务,也是高空台存在和发展的根基。

(2) 为航空发动机性能鉴定与适航认证做好高空模拟试验与把关。即要围绕发动机型号研制要求,在规定环境条件下通过严格规范的性能鉴定与适航认证高空模拟试验,检验发动机技术指标的符合性和边界性能,守住发动机产品管用、好用的列装关口。这是高空模拟的重大使命任务。

(3) 为航空发动机新技术发展与产品研制做好高空模拟能力规划与保障。即要围绕发动机研发规划及其对先进试验测试技术与方法的需求,主动融入发动机技术开发与产品研制产业链中;以目标和问题为导向,提前布局 and 开展高空模拟试验条件保障与能力生成、试验测试关键技术研究 and 性能效能结果评估方法研究,切实保障 and 加速航空发动机研发的关键性能指标 and 安全可靠性能不断提升。这是高空模拟持续发展的重要任务。

(4) 为持续发挥高空台的作用,必须高质量做好研发体系与人才队伍的建设。

从具体的试验方法和科目看,航空发动机高空模拟试验任务分为3类。第1类是明确规定的高空台试验,指在发动机通用规范 or 相关标准中明确规定需要在高空台上开展的试验项目。主要有高空校准

表1 世界主要国家航空发动机高空模拟试验能力对比
Table 1 Comparison of capabilities of aero-engine altitude simulation test for major countries in the world

国家	主要试验基地	模拟高度/km	模拟马赫数	试验能力
美国	阿诺德工程发展中心	0~30	0~4.0	拥有13个燃气涡轮发动机高空试验舱,满足航空发动机高空模拟试验需求
俄罗斯	中央航空发动机研究院	0~27	0~4.5	拥有不少于5个高空试验舱,满足航空发动机高空模拟试验需求
英国	英国国家燃气涡轮研究院	0~25	0~3.5	拥有5个高空试验舱,目前均已关停
法国	法国发动机试验中心	0~20	0~2.5	拥有8个高空试验舱,满足航空发动机高空模拟试验需求
德国	斯图加特大学高空实验室	0~20	0~2.2	拥有1个高空试验舱,满足航空发动机高空模拟试验需求
中国	绵阳试验基地	0~30	0~4.0	拥有8个高空试验舱,满足航空发动机高空模拟试验需求

试验、高空性能试验、推力瞬变/功率变换试验、功能试验、空中起动和再起动力试验、空中进气畸变试验和高空风车旋转试验等。第2类是遵循惯例的高空台试验,指通用规范或相关标准中规定了相关试验要求与科目,但因难以找到适宜的自然环境或试验条件,通常需要在高空台上完成的试验项目。主要有高低温起动和加速试验、高原起动试验、修正系数验证试验、环境结冰试验、持久试车中的加温加压试验、发动机超温试验、发动机超温控制系统试验等。第3类是需求拓展的高空台试验,指发动机状态鉴定或适航认证有规定以及发动机研发有需要甚至必须在高空台上开展的试验。主要有单因素或多因素影响研究试验、复杂环境适应性试验、超边界性能试验等。

3 高空模拟试验的需求与主要挑战

正因为高空模拟试验在航空发动机研发中显著的作用和任务,其能力和水平得以随航空发动机的发展而持续进步。自1995年建成首座航空发动机高空台以来,为适应国内航空发动机蓬勃发展的试验需要,我国现已建成相对完备的涵盖涡喷、涡扇、涡轴、涡桨、组合动力试验等的高空舱和高空模拟试验技术体系,其设备规模和试验能力达到世界一流水平。总体看,目前我国高空模拟试验能力和水平与航空发动机研发需求相匹配。我国航空发动

机高空模拟在技术发展层面大致可分为5个阶段,如图3所示。

随着现代战争形态不断演化和市场竞争日益加剧,以及世界百年未有之大变局加速演进和科技革命与大国博弈相互交织,航空发动机研发更加注重其使用效能和任务遂行性的试验考核与评估;在研制质量与可靠性要求不断提高的同时,研制周期和成本大幅缩减使航空发动机研发范式发生深刻变化,数字化转型与全寿命试验评估成为必然。未来高性能航空发动机的研发趋势,将使高空模拟试验面临新的发展需求和严峻挑战^[7]。

3.1 探边摸底与实战化考核对高空模拟试验提出的机遇和挑战

一直以来,航空发动机工程研制和设计定型试验,主要针对典型环境条件下发动机技术指标的符合性。主要技术指标达标并通过定型列装后,即代表型号项目研制任务完成。由于航空发动机具有飞行包线宽广和使用环境复杂多变的固有工作特点,加之作战使用形态不断演变和市场竞争日益加剧,使得探边摸底与实战化考核试验的重要性不断突显。为此,高空模拟性能鉴定试验,除严格考核发动机在典型环境条件下的技术指标达标度和技术成熟度外,更加关注发动机的性能底数和复杂环境适应性的检验考核^[8]。要在贴近实战使用环境和极限边界下考核发动机的性能,高空台与高空模拟试验

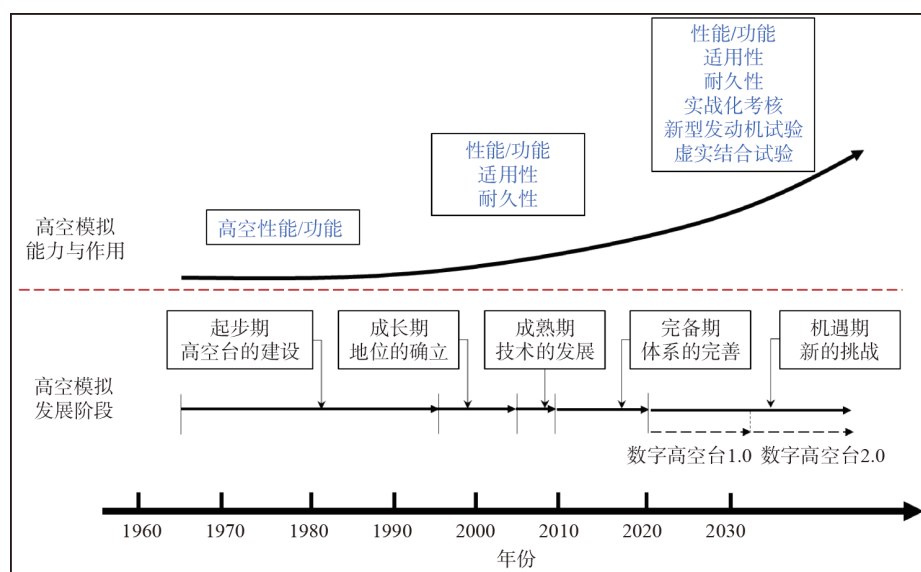


图3 国内航空发动机高空模拟技术发展趋势

Fig.3 Development trend of domestic aero-engine altitude simulation technology

是首选的重要平台和手段。这为高空模拟试验发展提供了新的重大需求,但同时复杂环境构建、极限边界试验方法、极端环境下参数精准测试、试验安全管控与结果评估等都带来了严峻挑战,如结冰防冰试验中大气环境构造、发动机瞬态性能测试评估等。

3.2 下一代与新型航空发动机研发对高空模拟试验提出的机遇和挑战

当前,航空发动机领域在面临严酷竞争的同时,也呈现出欣欣向荣、百花齐放的发展态势。涡喷、涡扇、涡轴、涡桨发动机研发如火如荼,自适应变循环发动机不断向产品化迈进;高空长航时无人机动力不断列装,高超声速组合动力研制加速推进;混电与全电发动机以及低空与通用航空动力研发前景利好不断。下一代与新型航空发动机研发对高空模拟试验提出了新的任务和场景需求,同时也提出了新的挑战。比如自适应变循环发动机的单/多外涵模式动态切换试验,就要求高空台具备动态流量调控能力,并在400~1 200 K温度范围内实现5 K以内的精确控制,才能够准确模拟真实使用中的热力状态转换^[9];高超声速组合动力试验面临的挑战更为严峻,需实现宽空域宽速域的进排气环境模拟,并在涡喷/冲压模态转换试验过程中,对进气道起动/不起动、燃烧模态切换等瞬态过程进行复现,且需具备正向与返程模拟能力,以验证模态转换的可逆性^[10]。这些都对高空模拟试验的能力生成、试验方法、测试技术和性能评估方法提出了新的挑战。

3.3 数字化转型对高空模拟试验提出的机遇和挑战

数字化转型是当代发展大势,也是航空发动机产业发展的必然趋势^[11]。美国AEDC已建成数字风洞与数字发动机集成平台,通过采用数值仿真及数字化试验技术,约减少了30%的实物发动机试验时数和约50%的研制总经费。目前我国正处于航空发动机数字化转型的重要阶段,按照数字化转型要求,我国航空发动机要逐步实现数字发动机与实物发动机同步定型列装、同步交付、同步形成能力。高空模拟试验应抓住机遇,顺势而为,着力解决试验数字化转型中数字化技术如何赋能实装高空模拟试验和数字发动机如何开展高空模拟试验这两大关键问题,抢占航空发动机数字化试验发展的制高点。当然,作为航空发动机研制中的重要环节,高空模拟试验数字化转型仍然面临巨大挑战。一方面,数字发动机高空模拟试验不同于传统实装试验,其具有试

验对象数字化、试验过程虚拟化等特点,这就对数字试验流程、数字试验方法、数字试验环境构造、数字试验参数测试与结果评估等提出了新的挑战;另一方面,通过数字化技术与人工智能技术相结合,赋能高空模拟试验方案设计、试验流程优化、试验资源调度、试验测点布局等环节,这对高空模拟试验设备数字模型构建、试验虚拟仿真、试验辅助决策等提出了更高的要求。

4 高空模拟试验的趋势与主要方向

随着战争形态的不断变化和市场竞争的日益加剧,航空发动机呈现出高效能、低成本、多元化和敏捷性的发展趋势。相应地,高空模拟试验发展趋势具有以下特点。

4.1 在深化性能特性研究的同时要向发动机使用效能评估方法研究发展

航空发动机高空性能功能准确评估与战技术指标符合性鉴定,是高空模拟试验长期以来的重点研究方向。随着发动机自主研制的不断深入,对高空模拟试验性能特性评估准确性和完备性提出了更高要求。持续开展高空模拟试验性能特性评估深入研究,重点包括以下4方面:一是在设计状态和标准大气状态性能评估基础上,开展非设计工况和非标准大气环境下稳态性能特性及其变化规律评估方法研究,构建全包线性能特性图谱,准确识别各类工况下的性能边界;二是在稳态性能评估基础上,加强定高度-速度条件下发动机过渡态特性和变高度-速度条件下发动机性能特性确定与溯源方法研究,评估发动机在加减速、模式切换以及变飞行条件等过渡态过程的动态响应特性,为发动机控制规律优化和稳定性评估提供支撑;三是在现有单台次发动机试验性能特性分析评估基础上,深化试验数据挖掘与大数据分析应用技术研究,建立同型号不同台次发动机甚至不同型号发动机高空试验性能特性的综合分析利用方法研究,为发动机试验优化和设计改进提供更多的数据支撑;四是在单独评估部件试验、整机试验与试飞试验性能特性的基础上,开展部件台-地面台-高空台-飞行台试验之间性能特性的相关性研究,掌握部件试验特性与整机试验环境下部件特性之间相关性和整机地面台试验-高空台试验-飞行台试飞试验之间性能相关性,并建立不同试验平台之间性能结果关联关系的确定方法,从而

以更低的试验代价和更短的试验周期来支撑发动机研发。

航空发动机在典型环境条件下性能达标,并不等同于发动机具有满意的作战任务遂行能力。服役环境下发动机必然面临复杂电磁环境、极端气象条件以及突发对抗因素的影响。为此,高空模拟试验需从典型环境条件下发动机战技术指标验证向贴近真实服役环境下发动机性能效能评估方法研究拓展。其重点包括:发动机机动飞行特性试验或飞发一体化试验设备设计关键技术与试验设计方法研究,进气畸变、结冰等复杂飞行环境和极端气象条件模拟环境下性能结果影响与评估方法研究,模拟复杂飞行环境条件下发动机试验参数测试方法研究,以及发动机的工作稳定性、环境适应性等性能效能确定与评估方法研究。这样,高空台在回答发动机典型环境条件下性能指标是否符合的基础上,进一步可为发动机性能底数和使用效能评估提供素材和参考依据。

4.2 在深化当前动力试验的同时要向下一代与新型动力试验方法研究发展

当前常规航空动力技术仍处于持续革新与激烈竞争中,发动机研发越来越注重复杂环境适应性和性能效能探边摸底的试验考核与验证,同时民用大涵道比涡扇发动机适航认证高空模拟试验需求愈益迫切。当前常规动力高空模拟试验深化研究重点包括:极低温和极高温环境发动机冷/热浸润试验方法研究,低空大马赫数条件下环境模拟与试验安全管控方法研究,舰载机使用场景下温度畸变试验方法研究,吞入大气中液态水高空模拟试验方法研究,航空发动机进气结冰(含冻细雨、过冷大水滴、冰晶混合相)试验方法研究,短舱内发动机放热及冷却模拟试验方法研究等。

针对自适应变循环发动机和高超声速组合动力等下一代与新型动力研制的高空模拟试验新需求,如单/多外涵模式动态切换、涡喷/冲压模态转换、宽空域宽速域飞行特性的试验验证与评估需求,高空模拟试验研究重点包括:飞行条件连续变化工况下宽范围发动机进、排气环境动态模拟技术研究,宽范围推力与空气流量等性能参数瞬态测试技术研究,宽范围高精度发动机分涵道流量测试技术研究,高超声速来流参数(总温、总压、马赫数)高精度测试技术研究等。

4.3 在深化物理模拟研究的同时要向数字化与智能化试验方法研究发展

高空模拟试验在研究发动机全包线性能特性方面具有突出优势。只有模拟环境贴近或等效真实,发动机试验中的工作特性与表现才与实际使用或要求考核环境中的一致,并且只有测试准确才能客观、准确评估发动机的设计符合性和使用性能效能。因此,环境真实、测试准确是发动机高空模拟试验研究的永恒主题。实装物理模拟试验持续深化研究重点包括:飞行任务剖面连续模拟技术研究,连续可变马赫数与姿态的自由射流喷管设计技术研究,飞行高度-速度条件和发动机姿态协同控制技术研究,发动机自由射流高空模拟试验设计方法研究,高温高湿复杂环境模拟技术研究,旋流畸变进气环境模拟技术研究,结冰试验中液态水(含水量、水滴有效直径等)与冰参数在线测量方法研究,畸变流场三维瞬态测量技术研究,多相流温度测量与校准技术研究等。

目前,航空发动机高空模拟试验主要为实装物理模拟试验。由于高空模拟试验的复杂性和对发动机环境适应性与性能效能底数摸清需求的日益迫切,单靠实装物理模拟试验不仅周期长、成本高,而且风险隐患也愈来愈大。为此,高空模拟试验需要不断加大数字化赋能和数字化转型方面研究:一是深化开展高空模拟试验多源信息感知与数据深度挖掘技术研究,解决底层数据感知、互联、治理、深度挖掘等技术难题,提升试验数据采集、分析、利用、挖掘效率,夯实试验数字化的基础支撑。二是积极开展高空台试验系统数字化建模与数字化运维技术研究,解决试验设备数字化设计、数字化安装及大型试验设备集群智能化运维等技术难题,达到优化试验流程、提升试验效能、降低试验风险的目的。在此基础上,利用发动机机理模型或基于试验数据建立的发动机模型开展虚实结合试验,达到以虚辅实的试验目的,可以减少实装试验的工况点和内容。三是开展发动机数字样机验证高空模拟试验设计与评估方法研究,构建覆盖高空模拟试验全过程的数字孪生体,解决数字空间与物理空间的实时交互和迭代优化的难题,以有效支撑实装发动机样机和数字发动机样机的同步鉴定试验。四是积极探索高空模拟虚拟试验和数字发动机高空模拟试验技术研究,这是适应发动机数字化转型和数字发动机样机1.0试

验的必须。其中,后面两方面研究,目前虽然还存在很多未达成共识或未知的关键技术,但也是当今数字化时代发展的大趋势,需加快研究,抢占制高点。

4.4 在深化应用技术研究的同时要向加强基础理论与前瞻性技术研究发展

高空模拟试验在我国航空发动机研发中发挥了重大作用。为更好地支撑发动机研发、技术攻关与改型升级,提高高空模拟试验的效率和效能,还需持续深化高空模拟试验应用技术研究。主要包括:数字化智能化高空模拟试验应用技术研究,飞行高度-速度、非标大气温度、湿度等综合环境构造技术研究,复杂压力畸变流场模拟与测试技术研究,旋流/总压组合畸变模拟装置设计方法研究,适航符合性高空模拟试验设计与评估方法研究等。

当前,我国航空发动机研发已基本实现由跟跑向并跑的跨越,高空模拟试验能力已超过俄罗斯,部分比肩世界第一的美国。因此,我国高空模拟试验要转变以应用技术研究为主的现状,加大基础理论和前瞻技术研究,才能切实支撑和助推我国航空强国战略和高水平航空科技自立自强目标的实现。一是加大高空模拟试验中基础性和机理性技术研究,如发动机结冰机理研究,进气畸变产生与传播机理研究,发动机进排气与高空台管网噪声源识别、耦合传播及抑制方法研究等。二是加大前瞻性技术研究,如高超声速组合动力的地面高空模拟试验设计理论与方法研究,高超声速组合动力高空模拟试验先进测试传感技术研究,发动机隐身特性试验测试理论与评估方法研究等。三是设立高空模拟基础理论研究联盟和探索性开放性基金库,更好地推动“1→0”基础科学问题凝练和“0→1”科学问题突破。

4.5 在服务高空动力试验的同时要向服务低空与通航动力试验研究发展

高空模拟试验的主要对象是航空涡喷、涡扇、涡轴发动机和临近空间动力。为此,要围绕国家军、民用航空发动机的研发,不断深化高空模拟试验技术和标准体系的研究。当前主要是围绕第五代自适应变循环涡扇发动机、大涵道比涡扇发动机、高空长航时无人机动力和高超声速组合动力,持续深化开展相关高空模拟技术研究,完善进气结冰、燃油结冰、吞水等环境适应性试验标准体系,贴近服役环境下发动机寿命试验及评估标准体系、民用航空发动机适航试验标准体系等。

当前,低空经济与通用航空产业发展如火如荼。尽管其动力的空中性能特性试验范围、试验要求、考核侧重点与高空飞行器动力有显著区别,但对鉴定试验与适航认证试验一样有迫切的特殊需求。既然低空经济与通用航空产业已经明确为国家战略性新兴产业,我们要责无旁贷地做好高空模拟试验技术共享、转移与服务,助推低空经济与通用航空产业的发展建设。为更好地助力和服务国家低空经济与通用航空产业的加速发展,应重点做好以下方面:一是研究并探索成熟高空模拟试验技术的适应性、适配性转移方法;二是搭建空中性能特性试验技术培训与服务平台;三是联合开展低空飞行器与通用航空动力适航认证空中试验的关键技术与标准研究。

4.6 在深化技术能力研究的同时要加强高水平试验测试人才的培养

高空台是国家战略资源,高空模拟试验关键核心技术等不来买不到,必须靠自己攻关突破,并牢牢掌握在自己人手中。因此,我国高空模拟试验,在聚焦当前航空发动机探边摸底与实战化考核、下一代与新型动力研发和数字化转型的核心关键高空模拟技术研究基础上,必须加大高水平试验测试人才队伍的建设与培养,实现高空模拟试验“硬平台”与“软实力”协同发展。建议依托航空发动机高空模拟试验基地和实验室科技教育人才一体化的特殊优势,加强加大院校联合和产学研用联盟建设,系统开展贴近工程实际的培训与实践,重点培养一批涵盖数值仿真、智能控制、测试计量、数值孪生等专业的技术人才。同时,应着力培育具备系统思维与前瞻视野的学术带头人,形成老中青协同创新的技术团队,为我国高空模拟试验关键技术的不断突破提供持续的智力支撑。

5 结束语

60年来,我国高空模拟试验能力实现了跨越式发展,试验技术体系不断完善,为我国航空发动机研发和自主保障能力提升作出了重大贡献。当前,我国航空发动机研发已经由跟跑迈向了并跑甚至领跑阶段,在大国博弈日益激烈、新一轮航空动力变革加速推进背景下,高空模拟试验发展建设必须提前布局、主动求变,深化基础理论与前瞻性技术研究,积极实施数字化转型,为实现航空发动机强国建设目标提供坚实基础和贡献更大力量。

参考文献:

- [1] 张玉金. 我国航空发动机高空模拟试车台的发展[J]. 航空科学技术, 1999, (3): 36–37.
ZHANG Yujin. Development of aero engine altitude test-bench of China[J]. Journal Aeronautical Science, 1999, (3): 36–37. (in Chinese)
- [2] 杜鹤龄. 航空发动机高空模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
DU Heling. Aero engine altitude simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [3] 卢传义. AEDC的航空推进试验设备和试验能力[J]. 国际航空, 2001, (1): 56–57.
LU Chuanyi. Aero propulsion test facilities and capabilities at AEDC[J]. International Aviation, 2001, (1): 56–57. (in Chinese)
- [4] 侯敏杰, 田金虎, 刘 涛. 航空发动机高空模拟试验[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
HOU Minjie, TIAN Jinhu, LIU Tao. Aero engine altitude simulation test[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [5] 张志国. 航空发动机高空模拟试验设施建设与发展思考[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(3): 56–62.
ZHANG Zhiguo. Consideration for construction and development of aero-engine altitude simulation test facility[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2022, 35(3): 56–62. (in Chinese)
- [6] CCAR-25-R4-2016, 运输类飞机适航标准[S].
CCAR-25-R4-2016. Transport category airplanes[S]. (in Chinese)
- [7] 熊 威, 卫 鑫. 对装备试验鉴定模式转型发展的思考[J]. 科技与创新, 2019, (3): 136–138.
XIONG Wei, WEI Xin. Transforming the paradigm of equipment testing and evaluation[J]. Science and Technology & Innovation, 2019, (3): 136–138. (in Chinese)
- [8] 李阿楠, 廖学军. 我军开展武器装备作战试验鉴定的思考[J]. 装备学院学报, 2016, 27(1): 107–110.
LI Anan, LIAO Xuejun. Reflection on appraisal on PLA's weapons and equipments operational test[J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(1): 107–110. (in Chinese)
- [9] 韩玉琪, 杨守波. 美国空军自适应循环发动机最新进展分析[J]. 航空动力, 2025, (4): 6–8.
HAN Yuqi, YANG Shoubo. Latest progress analysis on adaptive cycle engine of US air force[J]. Aerospace Power, 2025, (4): 6–8. (in Chinese)
- [10] 耿 嘉, 特日格乐. 美空军高超声速飞机技术难点分析[J]. 军民两用技术与产品, 2024, (10): 25–29.
GENG Jia, TERIGELE. Analysis of technical challenges for the U.S. air force's hypersonic aircraft[J]. Dual Use Technologies & Products, 2024, (10): 25–29. (in Chinese)
- [11] 陶 飞, 孙清超, 孙惠斌, 等. 航空发动机数字孪生工程: 内涵与关键技术[J]. 航空学报, 2024, 45(21): 630283.
TAO Fei, SUN Qingchao, SUN Huibin, et al. Aero-engine digital twin engineering: Connotation and key technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(21): 630283. (in Chinese)