

航空发动机测试技术发展及展望

池国仕

沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110000

DOI: 10.61369/SSSD.2025020002

摘要 : 现代航空业的发展, 离不开航空发动机辅助, 其中航空发动机需要将试验数据作为基础, 而其中测试技术可以支撑试验的开展, 有效获得高质量试验数据。试验数据的获取, 不仅可以促进产品升级, 改进设计活动, 并为性能优化提供理论依据, 还有助于展现构型结果。对此, 测试技术发展可以助力于航空发动机研制, 其中制造、试验验证属于重要技术。本文从航空发动机测试技术角度出发, 论述了测试技术具有的价值, 分析了技术发展情况, 并提出技术未来展望, 旨在介绍航空发动机测试技术, 为后续相关研究积累经验。

关键词 : 航空; 发动机; 测试技术

Development and Prospect of Aero-Engine Test Technology

Chi Guoshi

Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110000

Abstract : The development of modern aviation industry is inseparable from the assistance of aero-engines, which need to take test data as the basis, and test technology can support the development of tests and effectively obtain high-quality test data. The acquisition of test data can not only promote product upgrading, improve design activities, and provide theoretical basis for performance optimization, but also contribute to the presentation of configuration results. In this regard, the development of test technology can help the development of aero-engine, among which manufacturing and test verification are important technologies. From the perspective of aero-engine test technology, this paper discusses the value of the test technology, analyzes the development of the technology, and puts forward the prospect of the technology, aiming at introducing the aero-engine test technology and accumulating experience for the subsequent related research.

Keywords : aviation; the engine; test technique

引言

航空发动机属于热力机械设备的一种, 其具有高温、高压等特点, 能够适应各种环境, 其飞行范畴具有广阔性, 可以保障各种形式工作的开展, 在现代工业中占据重要地位。在该系统内部, 存在复杂热力进程, 具有较为严格的使用要求, 相关研究与发展, 促进了该技术的更新。为了提升航空发动机效率, 离不开大量试验活动的开展, 明确不同参数, 灵活使用各类装置, 获取参数定量, 从而提升技术评定效果, 使参数更加准确, 有效发挥出测试技术的价值, 促进该技术革新与发展。

一、航空发动机中测试技术发挥的价值分析

航空发动机具有许多部件, 其整体性能设计、调试以及性能优化, 都离不开试验数据支撑, 能够有效获取发动机不同截面、状态的参数情况, 并积极开展数据分析活动, 结合数据结果, 针对性优化设计航空发动机, 切实提升其性能。^[1]由于航空发动机不同部件产生的相互作用, 其中外界条件变化, 容易带来发动机性能改变, 需要开展试验活动, 明确发生的改变。对此, 试验测试水平的提升, 可以有效改善测试条件, 并深层次研究航空发动机试验技术, 使试验测试的参数更加准确, 提升试验可靠性, 并有

效分析数据, 其具体价值如下:

第一, 航空发动机各部件存在关联与影响, 可以在试验的帮助下, 对不同部件产生的影响进行论证, 减少各部件产生的相互影响, 提供更多依据、支撑。^[2]

第二, 为了使发动机具有更强的推力, 降低航空发动机油耗, 提升机动性, 并具有更高的可靠性、耐久性, 需要开展试验、测试活动, 收获更多的参数, 寻找科学的改进技巧。^[4]

第三, 航空发动机需要从不同指标出发, 开展试验验证工作, 如方案设计、试验以及分析等, 其中, 需要借助良好试验方式、测试系统, 有效发挥其作用, 得到准确的测试数据, 提升发动机性

能、可靠性。^[6]基于此，高水平试验、测试的技术具有必要性。

二、航空发动机测试技术的发展

(一) 流量测试技术

学者 Hildebrandt 对进气流量管进行分析，介绍静压测量、修正技巧，涉及静压截面的位置选取、静压孔尺寸，灵活使用楔形测量工具，校准壁面静压。^[6]由于部分研究机构具有空气流量校准能力，使用先进装置，进行实时的监控。如 NASA 进气流量管校准设备，其前端使用高压气源进行供气，借助进气管道上的喷嘴，精准的判断空气流量，有效对后端发动机流量管进行校准。

在我国的空气流量的测试过程中，主要包括探针、流量计两种方式，而中整机与压气机试验活动，主要使用探针法进行测量，把握进口流量管流量，从发电机研制角度出发，需要开展相关试验、校准工作。^[7]而流量管流出系数，主要可以使用测量流量管，对各种情况开展理论性计算。但我国面对发动机的进气流量管设计、标准较为缺乏，出现设计与使用的规范性不足，缺乏对流量管测量准确度的研究与控制。基于此，相关部门开展深层次的研究，包括涡扇发动机的进气流量校准，有效解决空气流量出现的问题，包括测量、溯源等。

(二) 噪声测试技术

航空发动机属于飞机的主要动力装置是出现噪声的源头之一，其噪声主要来源于风扇、涡轮以及燃烧室等场所，其中噪声控制、测试技术受到广泛关注。^[8]20世纪60年代国外针对噪声开展了相关研究，并建设了发动机噪声的测试标准、试验规范等。NASA 提出了静音飞机理念，并开展试验测试活动，使用旋转传感器的形式，成功对发动机风扇产生的声音进行模拟测量。^[9]NASA 为了清晰认识到飞机发动机在不同工作状态下出现的辐射噪声、噪声源等，通过使用麦克风阵列，对发动机开展了一系列的噪声测量活动。

随着社会经济的发展，民用飞机的研制需求有所增加，我国对于航空发动机噪声测试开展广泛研究，并取得良好效果。为了满足时代需求，我国建设专业的发动机实验室，对发动机风扇、压气机等部件噪声进行试验。相关设施的建设与完善，使我国初步具有了测量航空发动机噪声的能力。^[10]当前，我国可以开展近场、远场以及声音模态等类型的噪声测试，形成了较为完善的噪声测试体系。面对航空发动机噪声测试，我国可以开展形式多样的测试工作，如部件级、整机级测试，同时，具有多层面的测试能力，涉及近场噪声、远场噪声以及异常噪声的识别。相关能力可以在航空发动机的各层面加以应用，包括故障诊断、声场分析以及噪声源识别等，开展有效的分析工作。但是面对综合验证方面存在一些不足，包括模型级、分系统级等。基于此，需要注重关键试验测试技术的突破与改善，推动噪声测试技术发展，为航空发动机优化积累经验。

(三) 几何参数测试技术

几何参数可以为发动机安全性能提供保障，在航空发动机中，叶尖间隙影响到发动机效率、耗油以及可靠性等方面，欧洲

地区开展了相关研究，分析高温部件的叶片间隙，研究测量电容传感器材料工艺的优化。

在当前时代背景下，将飞秒脉冲激光作为依据开发间隙测量技术，能够进行叶间、轴向等间隙的测试活动，在航空发动机的结构参数测试领域，展现出广阔应用前景。当前，该技术在部分领域得到了验证，如压气机，可以使间隙测量精度，测量距离更加精确，基本实现技术国产化。另外，我国掌握了整机间隙 X 射线测量技术，可以对部分航空发动机进行测量，判断其工作状态下篦齿密封效果，明确发动机结构是否出现变化偏移。

(四) 人工智能测试技术

人工智能技术是当前阶段的技术学科之一，从航空发动机测试角度出发，在具体试验验证环节，人工智能技术的使用可以构建试验数据库，对发动机进行性能分析，有效缩短产品的研发周期。人工智能技术具有语音、图像以及性能等测试效果，可以对测试技术、试验件开展有效测试验证。基于人工智能技术发展，语音识别属于非接触性识别技术，通过融合语音识别与测试技术，有助于在线指令的生成。面对被控对象开展目的性测试。在具体试验测试过程中，可以对发动机试验过程出现的各种声音进行收集，判断声音状态，了解其可测试性，明确发动机状态，判断故障发生位置。人工智能语音识别技术可以替代部分人员工作，减少测试对人员的依赖性，提升测试准确度。

另外，视觉识别是人工智能的重要组成，可以代替人眼进行测量与判断。图像系统可以把握信号开展形式多样的运算，明确目标特点，从而根据结果把握现场设备动作，有效测试航空发动机。在实际的航空发动机试验过程中，通过人工智能视觉识别技术可以实时监控发动机状况，对测试进行拍摄取样，有效代替员工处理恶劣工作工况，使测试更加高效。

三、工程热物理在航空发动机测试中的应用

(一) 热力学分析对发动机性能优化的贡献

热力学分析在航空发动机测试中的应用，主要体现在通过对发动机工作过程中的能量转换、热量传递和热流分布的精准预测，从而优化发动机的整体设计与性能。

热力学分析可以帮助工程师优化燃烧过程。燃烧室内的气体温度极高，对燃烧室的温度分布进行合理分析，可以避免局部高温对发动机部件的损害。通过热力学建模，工程师能够精确地预测燃烧室的温度场，调整燃烧器设计和燃料喷射方式，以确保燃烧的均匀性，提高燃烧效率，降低热损失。

另外热力学分析在热负荷管理方面也起到了关键作用。通过对发动机各部件的热流量和热传递过程进行精确计算，热力学模型能够帮助工程师识别出热负荷分布不均匀的区域，并采取相应的设计优化措施。例如，在涡轮叶片和涡轮壳体之间的热交换区域，热力学分析能够揭示温度梯度变化，从而帮助优化冷却气流的设计，确保热负荷均匀分布，延长发动机的使用寿命。

(二) 高效冷却技术的研究进展：气冷与液冷

气冷的基本原理是通过发动机内部的气流将热量带走，从而

降低部件温度。为了提高气冷系统的效率，研究者们已经开发出多种创新性的冷却设计方案。

为了提高冷却效果，现代航空发动机采用了“孔板冷却”和“脉冲冷却”等技术，这些技术能够显著提高冷却效率，并减少冷却气流对发动机性能的负面影响。另外，气冷技术在燃烧室和其他高温部件的应用中也取得了不少成果。例如，采用“冷却气体层”技术，在燃烧室壁面和热气流之间形成一层冷却气体，能够有效阻止高温气体直接接触发动机结构，减少热负荷并提高发动机的整体稳定性。

液冷技术在航空发动机中的应用相对较新，但其具有较高的热传导效率，因此在某些高性能发动机中得到了越来越广泛的应用。液冷系统主要依靠液体的高热容量来进行热量的传导和散失，通常使用的是冷却液或特殊液体。

液冷技术的一大优势是能够提供更强的热交换能力，在发动机的高温区域，液冷系统能够比气冷系统更有效地带走热量。例如，在一些先进的高温合金部件中，液冷系统能够通过更高的热导率减少热量积聚，从而降低部件的温度，提高发动机的使用寿命和可靠性。

四、航空发动机测试技术的展望

在当前时代背景下，航空发动机测试技术可以覆盖测试需求，但航空发动机的设计、测试技术发展速度较快，发动机测试面临挑战，对未来进行展望，需要重视以下层面的工作：

其一，重视数据有效性研究工作的开展。在航空发动机测试实践中，要注重测量结果，真正做到测量的稳、准，注重数据有效性研究的深化。另外，需要重视专业测试装备，开展科学管理活动，了解专测设备管理，注重校准规范的明确，使数据具有可溯源特点。同时，可以灵活使用数据，建设良好的测试数据库，顺利开展仿真测试，将大数据、人工智能等技术加以融入，提升数据使用率，为后续发动机设计工作提供指导。

其二，进行测试技术标准体系的优化。促进行业标准与规范的构建，有效建设水平先进、布局合理的航空发动机测试体系，为高效的航空发动机研制提供保障。

其三，开展行业之间的协调、合作，有效把握各领域测试技术，将其有效融入航空发动机测试领域。密切不同工业领域的合作，并积极引进先进测试技术、理念。

参考文献

- [1] 孙海龙, 王亮, 耿欣, 等. 航空发动机高精度高效温度畸变测试技术研究 [J]. 测控技术, 2024, 43(08): 37-43+57.
- [2] 丁旭, 王浩, 宋江涛, 等. 航空发动机台架红外辐射特性测试技术研究 [J]. 激光与红外, 2024, 54(01): 78-83.
- [3] 王亮, 孙颖. 航空发动机测试数据准确性和可靠性保证 [J]. 航空发动机, 2023, 49(05): 64-77.
- [4] 宋昕宜, 刘宜胜. 基于 NX 的航空发动机测试受感部参数化设计 [J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(09): 60-65.
- [5] 董干, 张译元, 郝宁宁. 商用航空发动机燃油喷嘴雾化锥角测试技术研究 [J]. 价值工程, 2023, 42(23): 101-103.
- [6] 郭霞, 张京霞. 航空发动机技术出版业务规则校验技术 [J]. 航空维修与工程, 2023, (07): 34-38.
- [7] 郭霞, 张京霞, 车轩, 等. 航空发动机技术出版物构型管理研究 [J]. 航空维修与工程, 2023, (01): 50-53.
- [8] 刘一鸣, 王晓东, 陈杰. 基于 S1000D 标准构建航空发动机技术资料体系 [J]. 航空动力, 2022, (05): 59-63.
- [9] 沈宏, 李帅, 周丽, 等. 民用航空发动机技术出版物质量提升技术研究 [J]. 航空标准化与质量, 2022, (04): 32-36.
- [10] 谈梦妮, 邱明星, 谷艳萍, 等. 航空发动机技术研究及产品研制互锁机制研究 [J]. 航空动力, 2022, (02): 62-64.