

航天发动机装配技术要点分析

闫文龙 李新瑀 王 振 李 童 王永建
首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要：本文全面深入地剖析了航天发动机装配技术要点。涵盖从传统到现代的装配工艺，详述航空发动机装配关键技术，包括数字化、自动化、精密测量、先进连接及智能规划优化技术，阐述虚拟装配系统结构、建模与仿真技术，着重探讨装配质量控制环节，如零部件、装配工艺、质量检测与人员管理方面的要点。通过对这些要点的详细解析，旨在为航天发动机装配领域提供系统性的技术参考，助力提升装配效率与质量，推动航天发动机制造技术迈向新高度，确保航天任务的可靠实施，增强我国航天装备在国际上的竞争力与影响力。

关键词：航天发动机；发动机装配；技术要点

引言：航天发动机作为航天系统的关键动力装置，其装配技术的发展水平直接制约着航天事业的进步。在航天工程不断追求高性能与高可靠性的当下，装配技术的优化与创新成为必然趋势。从早期依赖人工经验的传统装配工艺，逐步向数字化、自动化、智能化的现代先进装配工艺转变。航空发动机装配技术的发展为航天发动机提供了宝贵经验与借鉴方向，而虚拟装配技术的兴起更是为装配过程的优化提供了新契机。

1 航天发动机装配工艺概述

1.1 传统装配工艺

传统的航天发动机装配工艺历经长期发展，已构建起较为成熟的体系。在零部件加工完毕后，装配工作会依循特定顺序展开。一般先着手内部核心部件的组装，随后逐步向外推进至外壳等部件的安装，此装配顺序由发动机的结构特性与工作原理所决定。就如航空发动机装配，尽管航天发动机与之存在差异，但在从核心部件逐步向外装配这一顺序上具有相似性。在传统装配工艺中，人工操作占比较大。经验丰富的装配工人借助各类工具，像专用扳手、夹具等，对零部件进行手工安装与调整。这种方式对工人的技能水平和经验依赖度较高，因此对工人的培训要求也颇为严格。工人需熟练掌握各种工具的使用方法，熟悉发动机的结构和装配要求，凭借自身经验确保每个零部件的安装精度和可靠性，从而保证整个发动机的装配质量。

1.2 现代先进装配工艺

随着科技的不断进步，数字化装配技术成为现代航天发动机装配的关键发展方向。借助三维建模和仿真软件，能够在计算机上对发动机的装配过程予以虚拟演示。类似航空发动机装配中应用的数字孪生技术，航天发动机装配运用此技术可在虚拟环境中预先察觉可能出

现的装配干涉、零部件不匹配等问题，进而优化装配方案，提高装配的成功率和效率，减少实际装配中的错误和返工。自动化装配设备的应用愈发广泛。比如，机器人手臂能够精准地完成诸如螺栓拧紧、零部件搬运等重复性高且精度要求高的装配任务。机器人的应用不仅提升了装配效率，还降低了人为因素导致的误差，使装配质量更加稳定可靠。而且，自动化装配设备可以在一些恶劣环境或对人体有危害的工作场景中替代人工操作，保障了操作人员的安全，进一步推动了航天发动机装配工艺的发展。

2 航空发动机装配方面的关键技术

2.1 数字化装配技术

数字化技术在航空发动机装配中占据重要地位。通过三维建模与仿真软件，能够在虚拟环境中对发动机的装配过程进行精确演示，提前发现潜在问题，如装配干涉、零部件不匹配等，从而优化装配方案，减少实际装配中的错误和返工。比如，在设计阶段利用数字孪生技术，构建与物理实体高度相似的虚拟模型，实时反映发动机的状态和性能，为装配工艺的制定和优化提供有力支持。此外，数字化测量技术可实现对零部件的高精度测量和数据采集，确保装配的准确性和一致性，提高发动机的整体质量和可靠性。

2.2 自动化装配技术

自动化装配设备的应用极大地提高了航空发动机的装配效率和质量。机器人手臂是其中的典型代表，它能够精准地完成螺栓拧紧、零部件搬运等重复性高、精度要求高的任务，有效减少了人为因素带来的误差^[1]。自动化装配线则实现了发动机装配的流水化作业，按照预定的程序和节拍，将各个零部件依次装配成完整的发动机，提高了生产效率和产品质量的稳定性。自动化装配

系统还具备数据采集和监控功能,能够实时记录装配过程中的各项数据,便于质量追溯和问题排查。

2.3 精密测量技术

航空发动机零部件的精度要求极高,因此精密测量技术是保证装配质量的关键。三坐标测量仪、激光跟踪仪等先进测量设备能够对零部件的尺寸、形状、位置等进行精确测量,误差可控制在微米级别。在装配过程中,通过实时测量和反馈,可及时调整零部件的位置和姿态,确保各个部件之间的配合精度。此外,无损检测技术如超声波检测、射线检测等,可用于检测零部件内部的缺陷和损伤,保证装配的零部件质量可靠,避免因缺陷零部件导致的发动机故障。

2.4 先进连接技术

航空发动机的高性能要求其零部件之间的连接必须牢固可靠。先进连接技术如焊接、铆接、螺栓连接等在装配中得到广泛应用。比如,电子束焊接技术能够实现高精度、高质量的焊接,适用于钛合金等难熔金属的连接;而新型的铆接技术和高强度螺栓连接则可确保发动机结构的稳定性和密封性。这些连接技术不仅要保证连接强度,还要满足发动机在高温、高压、高速等恶劣工况下的使用要求。

2.5 智能装配工艺规划与优化技术

借助人工智能和大数据分析技术,对航空发动机的装配工艺进行智能规划和优化。通过对大量历史装配数据的分析,建立装配工艺模型,预测可能出现的问题,并制定相应的解决方案。同时,根据发动机的不同型号和装配要求,自动生成最优的装配工艺流程,提高装配效率和质量的同时,降低生产成本。

3 虚拟航空发动机装配技术

3.1 构建虚拟装配系统结构

虚拟航空发动机装配系统结构的构建是实现虚拟装配的基础,其主要由硬件系统和软件系统两大部分构成。(1)硬件系统作为虚拟装配系统的物理支撑,包括高性能计算机、图形工作站、数据采集设备以及虚拟现实交互设备等。高性能计算机和图形工作站为系统提供强大的运算能力和图形处理能力,确保复杂的航空发动机模型能够快速、流畅地加载和显示,以及在装配过程中的实时交互响应。数据采集设备如三维扫描仪,可精确获取发动机零部件的实际几何形状和尺寸数据,为虚拟模型的创建提供准确的基础信息,保证虚拟模型与实际零部件的高度一致性。虚拟现实交互设备如头戴式显示器、手柄、数据手套等,使用户能够身临其境地参与到虚拟装配过程中,通过自然直观的手势和动作与虚

拟环境进行交互,大大增强了装配过程的真实感和沉浸感。(2)软件系统则是虚拟装配系统的核心,涵盖了操作系统、三维建模软件、装配仿真软件以及数据库管理系统等。操作系统为整个系统的运行提供稳定的环境支持。三维建模软件用于创建航空发动机零部件的精确三维模型,赋予其真实的几何形状、物理属性和材质信息,使虚拟模型能够准确地反映实际零部件的特征^[2]。装配仿真软件是实现虚拟装配功能的关键,它能够模拟零部件的装配过程,进行装配顺序规划、装配路径优化、装配干涉检查等操作,提前发现和解决装配过程中可能出现的问题。数据库管理系统负责存储和管理发动机零部件的设计数据、工艺数据、装配数据以及用户操作记录等信息,实现数据的高效组织和共享,为虚拟装配过程提供数据支持和决策依据,确保装配过程的准确性和可靠性。

3.2 装配模型建模技术

装配模型建模技术是虚拟航空发动机装配的关键环节,直接影响到虚拟装配的效果和准确性。首先,基于航空发动机的设计图纸和技术要求,利用三维建模软件创建零部件的几何模型。在建模过程中,需要严格遵循建模规范和标准,确保模型的准确性和一致性。建模人员要对发动机的结构和原理有深入的理解,准确地描绘出每个零部件的形状、尺寸和细节特征,包括复杂的曲面、孔洞、螺纹等。为了使模型更加真实地反映零部件的物理特性,还需为其赋予材料属性,如密度、弹性模量、泊松比等,以及表面属性,如粗糙度、颜色、纹理等,使虚拟模型在外观和物理性能上与实际零部件尽可能接近。其次,定义零部件之间的装配关系是构建装配模型的重要步骤。通过设定配合约束关系,如面贴合、轴对齐、同心度等,确定各个零部件在装配体中的相对位置和方向,从而将分散的零部件组合成一个完整的装配模型。除此之外,还可以添加一些辅助信息,如装配基准、坐标系、装配层次结构等,以便更好地进行装配过程的仿真和分析。在建模过程中,要充分考虑模型的简化与优化,在保证模型准确性的前提下,尽量减少模型的复杂度,提高系统的运行效率,避免因模型过于复杂而导致的运行卡顿和响应延迟等问题。

3.3 仿真装配过程技术

仿真装配过程技术是虚拟航空发动机装配的核心内容,通过计算机模拟真实的装配过程,为实际装配提供指导和优化依据。在仿真装配过程中,首先要根据装配工艺规划确定零部件的装配顺序,并在虚拟环境中依次将零部件调入装配体中。通过碰撞检测算法,实时检查

零部件在装配过程中的碰撞和干涉情况,一旦发现潜在的装配冲突,系统会及时发出预警,以便装配人员能够及时调整装配路径和装配顺序,避免在实际装配中出现零部件无法安装或安装错误等问题。同时利用动力学仿真技术,可以模拟零部件在装配过程中的运动行为和受力情况,如螺栓拧紧过程中的扭矩变化、零部件的重力影响等。通过对这些物理现象的模拟,可以更加准确地评估装配过程的可行性和可靠性,为装配工艺参数的确定提供科学依据,确保装配质量和发动机的性能指标。除此之外,还可以对装配过程进行可视化展示,通过动画、视频等形式直观地呈现装配的全过程。这种可视化展示不仅可以帮助装配人员更好地理解装配步骤和要求,提高装配培训的效果和效率,还可以方便设计人员和工艺人员对装配过程进行审查和优化,及时发现和改进存在的问题。

4 航天发动机装配的质量控制

4.1 零部件质量控制

(1) 原材料检验: 航天发动机的性能要求决定了其对原材料的高品质要求。从金属材料到复合材料,每一种原材料都必须经过严格的化学成分分析、物理性能测试等,以确保其符合设计的强度、韧性、耐高温、耐腐蚀等性能指标。比如,用于制造燃烧室的高温合金,需精确检测其合金成分比例,任何微小的偏差都可能导致材料在高温下的性能不稳定,进而影响发动机的整体性能。(2) 零部件加工精度控制: 采用高精度的加工设备和先进的工艺技术,对发动机的各个零部件进行加工制造。严格控制尺寸公差、形状精度以及表面粗糙度等参数,确保零部件之间的配合精度达到设计要求。如涡轮叶片的加工,其复杂的曲面形状和极小的尺寸公差要求,需要运用精密的五轴联动加工中心,并结合先进的数控编程技术,才能保证叶片的型面精度和尺寸精度,从而实现与涡轮盘等部件的良好配合,提高发动机的气动效率和可靠性。

4.2 装配工艺控制

(1) 装配流程设计: 根据发动机的结构特点和技术要求,精心设计科学合理的装配流程。明确各个零部件的装配顺序、装配方法以及装配过程中的技术参数和注意事项。例如,在火箭发动机的装配中,燃料输送系统的管路连接必须按照特定的顺序和力矩要求进行,以

确保管路的密封性和可靠性,防止燃料泄漏等故障的发生^[3]。装配环境控制: 为保证装配质量,装配工作需在清洁、恒温、恒湿、无尘的环境中进行,避免杂质、灰尘等污染物进入发动机内部,影响发动机的性能和可靠性。同时对于一些高精度的装配操作,如轴承的安装、密封件的装配等,还需要在专门的净化间或装配台上进行,以确保装配精度。

4.3 质量检测与监控

(1) 过程检测: 在装配过程中,采用多种检测手段对装配质量进行实时监控。如使用三坐标测量仪对零部件的装配位置进行精确测量,确保其安装位置符合设计要求;利用光学检测设备对焊缝、密封面等关键部位进行无损检测,及时发现潜在的缺陷和问题。(2) 最终测试: 装配完成后,发动机需进行全面的性能测试和功能验证。包括静态测试、动态测试、热试车等,以检验发动机在不同工况下的推力、燃烧效率、温度分布、振动特性等性能指标是否满足设计要求。通过这些严格的测试,可以充分暴露发动机在装配过程中可能存在的质量问题,并及时进行调整和改进。

结束语

总之,航天发动机装配技术要点贯穿于整个装配流程与质量保障体系。先进装配工艺与关键技术的应用,极大地提升了装配的精准度与效率,虚拟装配技术则为装配规划与优化提供了有力支持。而质量控制环节的严格把控,从零部件源头到装配全过程,再到最终的性能测试,构建起了一道坚实的质量防线。随着科技的持续创新,航天发动机装配技术必将持续演进,不断突破现有局限,朝着更高的性能标准、更智能化的装配模式以及更严格的质量管控方向发展,为我国航天事业的辉煌成就奠定坚实基础。

参考文献

- [1]李洋.航空发动机装配工艺执行系统关键技术研究[J].工程与试验,2024,64(2):54-56.
- [2]刘震磊,刘博浩,吕勤云,李月月,李闯,张瑞祥.虚拟现实技术在航空发动机装配教学中的研究与应用[J].中国信息技术教育,2023(21):104-109.
- [3]朱银方,劳贤豪,黎琨.数字仿真装配技术在航空发动机中的应用[J].数字技术与应用,2023,41(3):132-135.