

航天发动机装配技术分析

李 童 王永建 闫文龙 康海超 项天豪
首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要：航天发动机装配技术是确保发动机性能与可靠性的关键环节。本文深入探讨了航天发动机的装配工艺、特点、方法及关键技术，包括单元体装配法、部件装配法和总装方法。同时，对转子组合件同心度控制技术、涡轮导向器喉道面积测量技术和精密流量与密封检测技术进行了详细阐述。本文还关注了数字化装配技术在航天发动机装配中的应用，旨在为提高航天发动机装配质量和效率提供技术支持。

关键词：航天发动机；装配技术；分析

引言

航天发动机作为航天器的动力心脏，其装配技术举足轻重。随着航天科技的不断进步，对发动机性能及可靠性的标准愈发严格。深入探究航天发动机的装配技术，优化工艺流程，提升装配精度与效率，成为确保航天任务圆满成功的关键所在。本文聚焦于航天发动机装配技术，旨在通过全面剖析，为提升装配质量、保障航天任务安全顺利执行提供有力支撑。

1 航天发动机装配工艺

航天发动机的装配工艺是一项高度复杂且精细的系统工程，它横跨多个专业领域，每个环节都至关重要，鉴于航天发动机普遍采用单元体设计，并且这些单元体在维护上具有一致性，因此在装配工艺上也展现出了相应的共性和内在联系^[1]。装配过程的总体框架清晰地划分了几个关键阶段。首先是单元体组装阶段，此阶段需要将各种零件和组件精密地装配在一起，形成可独立维护的单元体。这些单元体作为后续装配的基础，其质量和精度直接关系到整个发动机的性能。接下来是各部件组装阶段，将已经装配好的维修单元体进一步组合，形成更大的主单元体。这一过程不仅涉及单元体之间的精确对接，还包括部分成附件、管路和零件的装配，每一步都需要严格的质量控制。最后是总装阶段，这是将三大主单元体（通常是压气机、燃烧室和涡轮）与剩余的附件、零件组合成整机的过程。在这一阶段，所有的装配工作都必须达到极高的精度，以确保发动机能够顺利启动并稳定运行。与这些装配过程相对应的是各种检测方法，它们贯穿于整个装配过程中，用于确保每一步都符合设计要求和质量标准。这些检测方法不仅包括对零件和组件的检验，还包括对装配过程中可能出现的误差和缺陷的监测，以确保最终产品的性能和质量。

2 装配工艺的特点

航天发动机的装配工艺，堪称一项精密复杂的系统工程，它融合了多个专业领域的知识与技术，每一步都至关重要，不容有失。装配工艺的总体框架明确划分了三大关键阶段。在单元体组装阶段，各类精密零件与组件被巧妙地结合在一起，形成一个个可独立维护的单元体。这些单元体不仅是后续装配的基石，其制造精度与质量更是直接决定了整个发动机的性能表现。紧接着，各部件组装阶段将已装配好的单元体进一步整合，形成更大的主单元体。此阶段不仅要求单元体之间的精准对接，还需完成部分成附件、管路及零件的装配工作。每一步操作都需经过严格的质量控制，以确保装配的准确性和可靠性。总装阶段将三大主单元体——压气机、燃烧室和涡轮，与剩余的附件、零件完美融合，组装成一台完整的发动机。在这一阶段，装配精度要求极高，任何微小的误差都可能导致发动机无法顺利启动或稳定运行。为确保装配过程的每一步都符合设计要求和质量标准，各种检测方法被广泛应用于整个装配流程中。这些检测方法不仅针对零件和组件的检验，还涵盖了装配过程中可能出现的误差和缺陷的监测，从而确保最终产品的卓越性能与高质量。

3 航天发动机装配方法

3.1 单元体装配法

单元体装配法是航天发动机制造过程中的一项关键技术，它通过将发动机合理划分为多个独立的单元体，实现了高效的并行装配流程。这种方法的核心思想在于将复杂的装配任务分解为多个相对简单的子任务，每个子任务独立进行，从而大幅度提升了装配效率和质量控制水平。在单元体装配法中，维修单元体的组装是第一步。这一步骤涉及将各种精密的零件和组件按照设计要求进行精确装配，形成一个个独立的、可维护的单元

体。这些维修单元体通常是发动机中的关键部件，如压气机、燃烧室、涡轮等，它们的性能和可靠性直接决定了整个发动机的性能表现。紧接着，主单元体的组装是单元体装配法的关键步骤。在这一阶段，已经装配好的维修单元体被进一步组合在一起，形成更大的、功能更为完整的单元体。主单元体的组装不仅包括维修单元体之间的精确对接，还涉及部分成附件、管路和零件的装配工作。这一步骤要求极高的装配精度和质量控制，以确保各单元体之间的完美配合和整体性能的稳定。通过单元体装配法，航天发动机的制造过程变得更加高效和可控。每个单元体都可以在独立的装配线上进行装配和测试，从而减少了装配过程中的等待时间和资源浪费。由于每个单元体都是独立测试和验证的，因此可以更容易地追踪和定位潜在的质量问题，提高了整个发动机制造过程的质量可靠性。

3.2 部件装配法

部件装配法是航天发动机制造中一项至关重要的工艺方法，它通过将发动机合理划分为多个独立的部件，实现了高效的模块化装配流程。这种方法不仅提高了装配质量，还增强了发动机的整体性能和可靠性。在部件装配法中，基准零件的选择是首要步骤。通常，会选择发动机中的一个关键零件，如压气机轴，作为整个部装的基准。这个基准零件在装配过程中起到定位和支撑的作用，确保其他组件和零件能够按照设计要求精确地安装到位。接下来是组件装配阶段。在这一阶段，需要在基准零件上装上若干组件、套件和零件，形成一个个独立的部件。这些部件通常是发动机中的功能单元，如压气机组件、燃烧室组件、涡轮组件等。在装配过程中，需要严格控制装配精度和配合间隙，以确保各部件之间的完美配合和整体性能的稳定。通过部件装配法，航天发动机的制造过程变得更加模块化和可控，每个部件都可以在独立的装配线上进行装配和测试，从而减少了装配过程中的交叉作业和干扰^[2]。由于每个部件都是独立测试和验证的，因此可以更容易地追踪和定位潜在的质量问题，提高了整个发动机制造过程的质量可靠性。部件装配法还有利于实现并行装配，提高了装配效率。

3.3 总装方法

总装方法是航天发动机制造流程中的关键环节，它涉及将各个精心制造和测试的部件、单元体、附件以及成品件精准地组合成一台完整的发动机整机。这一过程不仅要求高度的技术精准性，还需确保每个组件都能完美协同工作，以实现发动机的最佳性能。主机装配是总装过程中的核心技术内容。它主要涉及各主单元体之间

的精确安装，这些主单元体通常是发动机的核心组成部分，如压气机、燃烧室和涡轮等。由于这些单元体的重量和体积都相当可观，当前主要采用手工操作，并借助吊车等重型设备来完成它们的调姿和定位。这一步骤要求极高的装配精度，任何微小的偏差都可能对发动机的整体性能产生重大影响。外部装配则是总装过程中的另一重要环节。它涉及发动机外部结构的安装，包括各种附件、管路以及安装系统等。这些外部结构不仅起到支撑和保护发动机的作用，还负责传输燃料、冷却介质以及控制信号等。外部装配的技术含量也相当高，需要精确测量、精细装配以及严格的质量控制。在总装过程中，为了确保每个组件都能准确安装到位，并保持良好的工作状态，还需要进行一系列的调试和测试工作。这些工作包括检查各部件之间的配合间隙、调整转动部件的平衡性、测试控制系统的灵敏度等。通过这些调试和测试，可以及时发现并纠正潜在的质量问题，确保发动机在交付使用后能够稳定、高效地运行。

4 航天发动机装配关键技术

4.1 转子组合件同心度控制技术

转子组合件的同心度控制技术是航天发动机制造中的一项关键技术，对发动机的性能和安全性具有至关重要的影响。传统上，转子组合件的同心度测量主要依赖于塞尺或塞规等工具，通过测量间隙来评估同心度。然而这种方法存在测量精度和准确性较差的问题，难以满足现代航天发动机对高精度装配的要求。随着技术的不断进步，现在采用了更为先进的转静子同心度装配工艺检测技术。这种技术通过评估静态条件下的转子和静子的相对位置，可以实现对高压涡轮叶尖间隙的准确测量和控制调整。相比传统方法，这种技术具有更高的测量精度和准确性，能够更有效地保证转子组合件的同心度要求。在同心度控制技术的实施过程中，需要严格控制各个环节的加工和装配精度。在转子加工过程中，需要确保各个零件的尺寸和形状精度符合设计要求；在装配过程中，则需要采用先进的装配工艺和工装设备，以确保各个零件之间的精确配合和定位，还需要采用有效的质量管理体系等，以确保同心度控制技术的稳定性和可靠性。

4.2 涡轮导向器喉道面积测量技术

涡轮导向器喉道面积的大小对发动机的性能具有直接影响，因此其测量技术显得尤为重要。目前，涡轮导向器喉道面积的测量方法主要分为直接测量法和流体差分式排气面积检测技术两种。（1）直接测量法是通过测

量喉道的具体尺寸（如宽度和高度）来计算面积。这种方法虽然直观，但存在工作量大、效率低以及重复定位测量精度不高的问题。在实际操作中，由于需要多次定位和测量，容易引入人为误差，从而影响测量结果的准确性。（2）相比之下，流体差分式排气面积检测技术则具有更高的测量精度和效率。该技术利用流体动力学原理，通过测量流体在喉道处的压力差或流量差等特征参数，推算出喉道的实际面积。这种方法不仅实现了高精度测量，而且能够在装配工艺过程中进行实时在线监测，大大提高了测量效率和准确性。（3）随着技术的不断发展，现代涡轮导向器喉道面积测量技术还结合了数字化、自动化等先进技术。采用数字量电感等传感器进行数据采集，通过杠杆采集原理完成测量点的数据采集，并利用测量装置进行自动计算、分析和输出。这些技术的应用进一步提高了测量的稳定性和可靠性。

4.3 精密流量和密封检测技术

航天发动机作为高精尖技术的结晶，其装配过程中的每一个细节都至关重要。其中，精密流量和密封性检测是确保发动机性能稳定性和安全性的两道重要防线。

（1）精密流量检测技术，旨在精确测量发动机内部流体的流量，这一技术通过高精度的流量传感器，实时监测流体在发动机管道中的流动情况，它不仅能反映出流体的流速和流量，还能及时发现流体系统中的异常现象，如泄漏、堵塞等，这对于确保发动机在各种工况下都能保持稳定的流体供应，从而维持其最佳工作状态至关重要^[3]。（2）而密封性检测则关注发动机各部件之间的连接是否紧密，是否存在泄漏隐患。在航天发动机的装配过程中，任何一个微小的泄漏都可能导致发动机性能的下降，甚至引发严重的安全事故。密封性检测显得尤为重要。通过采用先进的密封检测技术，如压力测试、氦质谱检漏等，可以准确地评估发动机各部件的密封性能，及时发现并修复潜在的泄漏点。这两项检测技术的应用，不仅提高了航天发动机装配的准确性和可靠性，还为发动机在工作过程中的长期稳定运行提供了有力保障。它们共同构成了航天发动机装配过程中的一道坚实防线，确保了发动机在各种极端环境下的出色表现。

5 数字化装配技术在航天发动机中的应用

（1）在航天发动机的装配流程中，数字化技术首先以虚拟装配为核心，通过高精度的虚拟仿真平台，全面模拟发动机的装配过程。这一步骤不仅实现了装配流程的可视化，更能在虚拟环境中及时发现设计缺陷与潜在问题，从而在设计阶段就进行修正，避免了后期更改带来的时间与成本损耗。（2）数字化柔性设计技术的运用，使得发动机实体建模、工艺规划及容差分析均得以数字化管理。三维建模软件构建出发动机的精确模型，为后续的装配工艺设计提供了坚实的基础。工艺设计则依据模型细化装配步骤，包括工具选择、方法确定等，而基于形位公差的容差分析则确保了装配的精准无误。

（3）数字化装配系统的引入，更是将航天发动机的装配推向了一个新的高度。自动化装配生产线、智能工装与先进的检测设备共同构成了高效、精确的装配体系。自动化设备与机器人协同作业，大幅提升了装配效率；智能工装如智能夹具、定位器等，则确保了装配的精准与稳定；而实时监测与检测设备的运用，则有效保障了装配质量的持续稳定。

结语

航天发动机装配技术涵盖广泛，每一环节都不可或缺。优化装配工艺、提升精度与效率，能显著提升发动机性能与可靠性。数字化装配技术的引入，为航天发动机装配领域带来了新机遇，也带来了挑战。展望未来，我们将持续探索创新，不断推动航天发动机装配技术迈向新高度，为航天事业的蓬勃发展贡献力量，确保航天任务的安全与成功。

参考文献

- [1] 崔本城. 航天发动机核心部件装配工序智能推荐及审查技术研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2021. 16-17
- [2] 赵昱, 李瑾岳, 徐茂程, 等. 航空发动机关键装配技术综述与展望[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 467-499.
- [3] 刘震磊, 刘博浩, 吕勤云, 等. 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.