

试探航天发动机装配技术

康海超 王劼宸 王洪宇 闫文龙 王 振
首都航天机械有限公司 北京 100076

摘 要：航天发动机装配技术涵盖精密组装、质量控制与性能验证等多个环节。通过改进与优化装配技术，如提高装配精度预测准确性、优化装配相位算法、加强同轴度控制等，显著提升发动机装配效率与质量。装配过程中，建立严格的质量控制体系与标准，运用在线检测技术实时监测，实施最终性能测试与验证，确保发动机性能达标。同时，装配过程数据追溯与分析为持续优化提供数据支撑。

关键词：航天发动机；装配技术；质量控制；检测

引言

航天发动机作为航天器的核心动力部件，其装配技术直接关系到发动机的性能与可靠性。随着航天技术的快速发展，对发动机装配精度的要求日益提高。因此，探索航天发动机装配技术的改进与优化，建立严格的质量控制体系，成为提升发动机性能、确保航天任务成功的关键。本文旨在探讨航天发动机装配技术的现状与发展趋势，分析关键工艺及未来创新方向。

1 航天发动机装配技术概述

航天发动机装配技术，作为航天科技领域的核心环节，其重要性不言而喻。航天发动机作为航天器的动力源泉，其性能与可靠性直接决定了航天任务的成败。因此，航天发动机装配技术要求高度的精确性，还需确保装配过程的稳定性和可靠性。航天发动机装配技术涵盖了多个专业领域，包括机械设计、材料科学、精密制造、自动化控制等。装配过程中，需对各种精密零部件进行精准定位和装配，以确保发动机内部各部件之间的精确配合；还需对装配过程中的各种工艺参数进行严格控制，如温度、压力、转速等，以确保发动机在装配过程中的稳定性和可靠性。航天发动机装配技术的难点在于其复杂性和高精度要求。发动机内部包含大量的精密零部件，如涡轮、压气机、燃烧室等，这些零部件之间的配合精度要求极高。航天发动机的工作环境恶劣，如高温、高压、高速等，对装配质量提出了极高的要求。因此，航天发动机装配技术需具备高度的专业性和技术性，以确保发动机在各种极端环境下都能稳定运行。为了应对这些挑战，航天发动机装配技术不断发展和创新。如引入先进的自动化装配设备和技术，提高装配精度和效率；采用先进的检测技术，对装配过程进行实时监测和反馈，确保装配质量；还不断优化装配工艺和流程，降低装配难度和成本。

2 航天发动机装配技术的改进与优化

2.1 提高装配精度预测的准确性

传统的预测方法往往难以充分考虑装配过程中复杂多变的影响因素，导致预测结果存在一定偏差。借助深度学习等人工智能技术，为这一难题的解决提供了新的途径。深度学习模型具有强大的特征提取和数据拟合能力，能处理海量的装配数据，包括零部件的尺寸公差、形状误差、材料特性、装配工艺参数以及装配环境因素等。通过构建多层神经网络结构，对这些数据进行深度挖掘和学习，模型自动识别出不同因素之间的潜在关联和复杂的非线性关系，更精准地预测装配精度。如发动机转子系统的装配中，轴与轴承的配合精度对整个系统的性能有着关键影响。深度学习模型可以综合考虑轴的圆柱度、粗糙度、轴承的游隙、刚度以及装配过程中的温度、湿度等环境因素，对转子的装配精度进行精确预测，提前判断能出现的装配偏差，如不平衡量、同轴度误差等。为了实现这一目标，首先要收集大量的发动机装配历史数据，并进行有效的预处理和标注，构建高质量的训练数据集。然后，选择合适的深度学习算法，如卷积神经网络（CNN）或循环神经网络（RNN），并通过多次训练和优化，调整模型的参数，提高其预测准确性和泛化能力。在实际装配过程中，将实时采集的装配数据输入到训练好的模型中，即可快速获得装配精度的预测结果，为装配工艺的调整和优化提供可靠依据，确保航天发动机的装配质量和性能稳定性，满足航天任务对高精度、高可靠性的严苛要求^[1]。

2.2 优化装配相位优化算法

（1）引入并行计算和分布式计算技术。并行计算明显加速复杂算法的求解过程，通过将任务分解为多个子任务并行处理，减少总计算时间。分布式计算则利用网络将计算任务分配到多台计算机上，加快求解速度。这

些技术的引入能提高算法的效率,还能增强系统的鲁棒性和可扩展性。(2)结合实际装配经验和数据进行算法优化。通过收集和分析历史装配数据,发现潜在的规律和模式,这些信息对于改进算法至关重要。可以利用机器学习技术对大量装配数据进行训练,建立预测模型,在实际装配中提供更精确的相位优化方案。此外,结合专家经验进行知识融合,也能提升算法的准确性和实用性。(3)实施动态调整和反馈机制。在实际应用中,装配环境和条件可能会发生变化,因此需要算法具备动态调整的能力。通过实时监控装配过程中的各项参数,并根据实际情况进行动态调整,确保装配过程始终处于最优状态;建立完善的反馈机制,及时收集和分析装配结果,不断优化和改进算法,以适应不断变化的装配需求和技术发展。总的来说,通过引入并行计算和分布式计算技术、结合实际装配经验和数据进行算法优化,以及实施动态调整和反馈机制,可以提高装配相位优化算法的求解效率和精度。这些措施能提升航天发动机装配的整体性能,还为未来更多先进技术的应用奠定了坚实基础^[2]。

2.3 加强同轴度控制的技术手段

航天发动机装配过程中,同轴度控制是确保发动机性能稳定、减少振动和噪音、延长使用寿命的关键环节。随着技术的不断进步,加强同轴度控制的技术手段也在持续创新和发展。激光测量技术在同轴度控制中扮演着重要角色。通过激光测量技术,实现对装配过程中同轴度的实时监控和调整。激光测量具有高精度、高速度和非接触性等优点,能准确测量发动机内部各部件之间的相对位置关系,及时发现并纠正同轴度偏差。机器视觉技术也为同轴度控制提供了新的解决方案。机器视觉技术通过图像处理和模式识别算法,实现对装配过程的自动化控制和监测。在装配过程中,机器视觉系统可以实时捕捉和分析发动机内部各部件的图像信息,根据图像特征判断同轴度是否满足设计要求,并自动调整装配参数,以确保同轴度控制在合理范围内。此外可以结合先进的传感器技术和控制系统,实现同轴度控制的智能化和自适应化。传感器实时监控发动机内部各部件的运动状态和位置信息,控制系统则根据传感器反馈的数据进行实时调整和优化,以确保同轴度控制的稳定性和准确性;加强同轴度控制的技术手段在航天发动机装配过程中具有重要意义,通过引入激光测量技术、机器视觉技术以及先进的传感器技术和控制系统,明显提高同轴度控制的精度和效率,为航天发动机的性能稳定和可靠性提供有力保障。

3 装配过程中的质量控制与检测

3.1 质量控制体系与标准

(1)在原材料入厂环节,需对各类金属、复合材料等原材料进行严格的成分分析、力学性能测试以及微观组织结构检测,确保其符合设计要求,从源头上把控质量。对于零部件加工过程,运用高精度的三坐标测量仪、轮廓仪等设备,实时监测尺寸精度、形状公差等关键指标,防止不合格零部件流入装配环节。在装配过程中,借助先进的传感器技术和自动化监测系统,对装配力、扭矩、位移等参数进行精确采集和分析,保证每个装配步骤都在严格的工艺规范下执行;整机性能测试阶段,通过模拟发动机在实际工作中的各种工况,如高温、高压、高转速等,对推力、比冲、可靠性等性能指标进行全面测试评估,只有各项指标达标,发动机才能进入下一阶段。(2)明确质量标准至关重要。国际上的MIL-STD系列标准为航天发动机质量控制提供了通用的指导框架,涵盖了设计、制造、测试等多个方面的基本要求。国内的GJB标准则结合我国航天工业的实际情况,细化和补充了相关规范,确保产品适应国内航天任务的特殊需求。在此基础上,企业内部制定的质量规范更加严格和具体,针对不同型号发动机的独特设计和性能要求,明确了各环节详细的质量指标。如对发动机关键部件的焊接接头,规定了具体的焊缝强度、密封性指标以及相应的检验方法,如采用X射线探伤、超声检测等无损检测手段,确保焊接质量无缺陷;建立完善的质量追溯系统,对每个零部件的生产批次、加工工艺参数、装配操作人员等信息进行详细记录,如果出现质量问题,能迅速定位根源,采取有效的改进措施,保证发动机装配质量的稳定性和可靠性,为航天任务的成功实施奠定坚实基础^[3]。

3.2 在线检测技术

航天发动机装配阶段,在线检测技术的应用至关重要。通过高精度三坐标测量仪和激光跟踪仪等设备,实时监测零部件的尺寸精度与装配位置偏差,实现数据采集与分析自动化,及时反馈调整装配过程,避免累积误差。这些设备的测量原理基于光学或激光干涉,具有极高的精度指标,通常在微米级甚至纳米级。在发动机装配车间,这些仪器被合理布局于关键工位,使用方法包括定期校准、精确定位以及数据实时传输与处理。如在某型号航天发动机的涡轮叶片装配中,通过三坐标测量仪实时监控叶片安装角度和位置,确保其满足设计要求,保证了发动机的整体性能。此外,工业内窥镜和超声检测等无损检测手段也被广泛应用于发动机内部结构

的检测。工业内窥镜利用光学成像原理,通过细小探头进入发动机内部,直观观察焊缝质量和内部缺陷;超声检测则通过发射超声波并接收回波信号来评估材料内部的完整性。这些技术的成像原理复杂但高效,信号处理方法先进,能准确识别微小缺陷。结合实例来看,在某次航天发动机装配中,使用工业内窥镜检查燃烧室内部焊缝,发现并修复了一处微小裂纹,避免了潜在的安全隐患。

3.3 最终性能测试与验证

推力测试通过推力测量台架进行,该台架由高精度传感器、数据采集系统和控制系统等组成,能实时监测和记录发动机产生的推力数据。比冲测试则评估发动机单位质量燃料所能产生的推力,是衡量发动机效率的重要指标。振动特性测试则利用振动测试系统,分析发动机在不同工况下的振动响应,确保其在运行过程中的稳定性和可靠性。可靠性试验则是对发动机进行长时间、高负荷运行测试,以验证其在极端环境下的耐久性和可靠性。这些测试通常需要在高温、高压、真空等特定环境下进行,以模拟发动机在太空中的实际工作条件。在完成测试后,要对测试数据进行深入分析与处理。通过建立性能与装配参数之间的关联模型,可以评估装配质量对发动机性能的影响,为后续装配工艺的优化提供数据支撑。如通过分析推力测试数据,发现推力不足或推力波动等问题,进而追溯到装配环节中的某个具体步骤或参数,进行针对性的改进。以某型号发动机为例,通过全面的性能测试与验证,成功发现了装配过程中的问题,并进行了相应的改进。

3.4 装配过程数据追溯与分析

(1) 建立全面且精细的数据采集系统是实现装配过程数据追溯与分析的前提。在航天发动机装配的各个环节,运用各类高精度传感器,对诸如零部件的尺寸精度、装配时的扭矩、压力、温度等参数进行实时采集;通过扫码、RFID等技术,记录每个零部件的批次号、生产时间、加工工艺路线以及装配操作人员等信息,确保数据的完整性和准确性,为后续追溯提供丰富的数据资

源。(2) 构建高效的数据存储与管理平台至关重要。将采集到的海量数据进行分类存储,采用合适的数据库架构,如关系型数据库与非关系型数据库相结合的方式,以满足不同类型数据的存储需求。运用数据清洗和预处理技术,去除无效和冗余数据,提高数据质量。在此基础上,开发专门的数据追溯查询系统,能根据发动机的型号、批次号、装配时间等关键信息,快速准确地回溯到各个装配环节的详细数据,为质量问题的排查和分析提供有力支持。(3) 深化数据价值挖掘,采用统计分析、数据挖掘及机器学习技术对装配数据进行深入分析。通过关联规则分析揭示装配参数与发动机性能的隐含联系,运用聚类分析识别异常模式和风险点。依据分析成果,指导工艺优化,持续提升装配质量,增强航天发动机性能与可靠性,确保航天任务成功^[4]。

结束语

综上所述,航天发动机装配技术的改进与优化对于提升发动机性能、确保航天任务成功具有重要意义。通过加强同轴度控制、提高装配精度预测准确性、优化装配相位算法等措施,可以显著提升发动机装配效率与质量。同时,建立严格的质量控制体系与标准,运用在线检测技术实时监测,实施最终性能测试与验证,为发动机性能达标提供有力保障。未来,航天发动机装配技术将持续创新与发展,为航天事业做出更大贡献。

参考文献

- [1]王晶龙,强薇,潘兆义,等.基于摄影测量技术的航天发动机装配过程几何参数测量方法研究[J].宇航计测技术,2023,43(2):36-41.
- [2]赵罡,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]曲洪亮,苏云玲,姚智奇,等.新一代航天发动机用齿轮箱的制造工艺技术研究[J].新技术新工艺,2021,401(5):19-23.
- [4]曲洪亮,孙晶,苏云玲,等.航天发动机用燃烧室的集成制造技术研究[J].新技术新工艺,2021(1):67-69.