

# 航空发动机数字化装配仿真关键技术研究

## Research on Key Simulation Technology of Aero Engine Digital Assembly

■ 刘志军 刘智武 吴晓锋 胡思嘉 魏小红 / 中国航发西航

数字化、自动化、智能化装配技术是提升航空发动机的装配质量和效率的必然手段，建立航空发动机数字化装配仿真流程架构模型，对数字化装配的关键技术进行分析，可以为实现航空发动机数字化智能装配提供支持。

航空发动机装配包括部件装配、总装装配等环节。相关研究表明，装配成本占航空发动机总成本的40%，装配工作占整机生产的50%以上，装配工艺及装配操作执行过程对航空发动机性能有着至关重要的影响。为保证航空发动机正常运行，首先，机匣、盘、轴、叶片以及喷嘴等零组件必须具有精密的配合和连接状态，高度的同心和同轴度，良好的转子平衡性和平稳性；其次，空气、燃油和滑油系统须具有良好的密封和清洁性；同时要求各附件和管线具有抗振、防磨以及绝缘等性能。

随着航空发动机推重比、可靠性等各项技术性能指标的提升，研发难度显著增大，传统装配技术已经难以满足航空发动机研发模式变革要求，面临的难题主要有：装配工艺设计及验证依靠技术人员经验和现场物理试装，须反复迭代更改，生产周期长；人工手动装配，装配精度可控性较差，效率提升缓慢；装配过程受人为因素影响较大，执行操作可靠性及装配质量稳定性不足，易出现错装、漏装的现象。

数字化智能装配技术能显著提高产品装配效率和质量，一直受到欧美等发达国家的高度重视。飞机

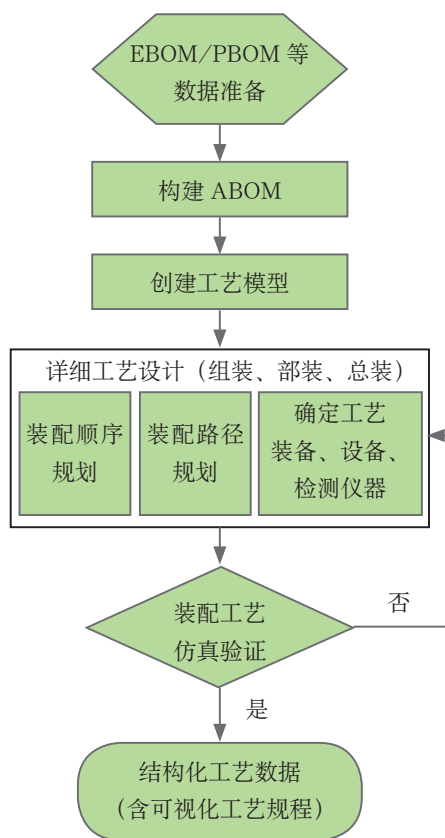


图1 数字化装配工艺设计与仿真流程架构

装配经历了从人工装配、半机械/半自动化装配，到自动化/数字化装配的发展，为了进一步提高飞机装配效率及质量，数字化智能装配技术已成为发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。结合航空工业的发展历程，为有效解决航空发动机数字化智能装配难题，提升航空发动机装配技术水平，

数字化装配工艺设计、装配工艺仿真、装配性能仿真等正成为航空发动机数字化智能装配的研究热点和发展趋势。因此，针对上述问题，笔者研究了航空发动机数字化装配工艺设计与仿真的流程架构模型，并提出了关键技术研究内容及解决途径。

### 数字化装配工艺设计与仿真的流程架构

数字化装配工艺设计与仿真是依据产品物料清单 (EBOM)、工艺物料清单 (PBOM)、工装和设备等数据构建装配物料清单 (ABOM)，基于产品三维模型建立轻量化工艺模型，通过装配顺序、装配路径规划开展详细装配工艺设计，并经过虚拟装配仿真形成三维可视化装配工艺规程等结构化工艺流程及数据，从而满足生产现场装配执行过程的数字化管控、可视化指导等要求，其基本工作流程如图 1 所示。

### 数字化装配工艺设计

数字化装配工艺设计通过装配工艺的可视化和结构化，可提高工艺设计质量，并保证装配工艺可操作性，同时可为生产现场提供数字化的装

配指令，是实现航空发动机数字化智能装配的基础。数字化装配工艺设计一般包括工艺模型构建、ABOM构建、装配工艺规划、容差分析以及三维可视化工艺生成等研究内容。

工艺模型的构建是基于模型的定义(MBD)技术，在产品MBD基础上创建轻量化的工艺模型，用于工装设计、大数据量虚拟装配仿真、三维可视化装配工艺编制。

ABOM构建是通过数字化手段实现装配工艺结构化的关键，在PBOM基础上增加外购件和外供件。

装配工艺规划与ABOM构建同步进行，建立相关零组件与装配工艺、工序、设备、工装之间的关系，规划零组件装配顺序，制定装配工艺细节技术要求。

通过工艺模型开展可视化装配工艺的文件编制和仿真验证，工艺设计结果已不再是传统的工艺规程，而是能够满足装配工艺数字化管理要求的整套结构化工艺数据，并清晰地反映出装配工艺、装配流程及工艺资源的相互关系。

数字化装配工艺设计离不开软件系统的支持，发动机企业应综合航空发动机装配工艺设计方法及流程、产品及工艺数据管理、车间数字化生产管控数据传递等方面的需求，开发建立适合自身产品的数字化工艺设计平台。

## 数字化装配工艺仿真

数字化仿真技术是航空发动机自主研发的必要手段，能够显著降低研发成本、缩短研制周期<sup>[2]</sup>。装配工艺仿真技术作为航空发动机数字化智能装配的关键技术之一，是在部件装配和总装装配过程中，以航空发

动机产品模型、工艺装备模型、产品实测数据等为基础，结合装配路径、工艺参数、装配精度和人机工程等方面的要求，在数字化虚拟环境中进行全装配过程的虚拟验证及工艺优化，从而保证装配方案的合理性、准确性和可实施性。航空发动机装配工艺仿真的研究内容包括两方面：一是装配工艺路径及装配顺序仿真、干涉检查、人机工程仿真等可装配性方面的分析验证，即虚拟装配；二是装配精度或装配性能方面的模拟验证，如转子堆叠模拟优化、叶片排列仿真优化等内容。

### 虚拟装配工艺仿真

在计算机中对发动机进行虚拟装配，通过装配工艺路径、装配顺序仿真，重点对装配过程是否发生干涉进行检查，可避免零件尺寸、工艺装备尺寸、装配顺序以及装配路径不合理导致的干涉问题。通过人机工程仿真，按照各零部件装配顺序、装配路径，对虚拟人体模型进行控制，模拟生产现场装配过程中工人的各种实际操作状态，可分析装配动作的可达性和可视性，同时对作业空间进行分析评估，以确保装配工人处于最舒适的工作姿势。

众所周知，波音公司在787客机研制过程中应用了三维数字化设计及仿真技术，成功缩短了装配工艺规划和更改的时间。以洛克希德-马丁(洛马)公司、普惠公司等为首的军工制造企业在产品研发过程中通过应用虚拟装配技术，也取得了巨大成就。目前，国内飞机制造企业在飞机装配工艺仿真技术研究及应用方面取得了较大进展，基于达索DELMI A软件平台，在装配工艺路径验证、干涉检查及人机工程等方面开展了飞机装配工艺过

程虚拟仿真技术研究及应用。吴腾等人在航空发动机低压涡轮装配过程中开展了相关研究，通过验证得出，数字化仿真代替物理样机试装能够检验装配过程的合理性，是对装配工艺及装配工具验证及优化的一种快速有效的手段<sup>[3]</sup>。复杂产品装配规划与仿真系统具有装配工艺设计、工艺路径仿真、装配工序图自动生成等功能，可提高产品一次装配成功率并降低装配成本。

从目前的研究及应用情况可以看出，虚拟装配仿真尤其适用于新型号研制或首批生产，以便优化工艺设计，缩短研制周期和降低成本。传统的三维数字化模型参与装配过程仿真导致数据量过大，对计算机软硬件和软件均提出较高要求，因此三维模型轻量化是装配工艺仿真应重视并解决的一个关键问题。产品三维模型、工装模型、设备模型和人体模型是实现装配工艺路径及装配顺序仿真、人机工程仿真等虚拟装配的基础，在航空发动机装配工艺仿真技术应用过程中应将相应模型及数据库构建作为一个重要项目来实施。

随着虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、混合现实(MR)等数字化、智能化技术的发展，智能装配技术已经得到了应用，如图2所示。波音公司通过应用该技术使得工人组装线束的错误率降低了50%，时间缩短了25%，GE、赛峰等企业也正在航空发动机装配过程中应用该技术。国内很多专家学者也开展了该方面的技术研究和应用验证，基于混合现实技术开发了智能装配系统，探索实现了虚拟装配技术在航空航天产品装配过程中的应用。基于



图 2 AR技术集成应用

VR、AR、MR及人工智能技术的虚拟装配仿真、数字化操作引导、自动智能检测技术，将是未来提升航空发动机等复杂装备装配效率和装配质量的一个重要方向。

### 装配性能仿真

采用装配精度或装配性能仿真，可根据产品装配所需的各类零部件的实测数据（如几何尺寸及公差、质量、偏心量等），确定合理的工艺参数，从而保证各零部件装配的最佳配合及连接状态、同轴度或平衡性等性能要求。

装配性能仿真涉及多种学科理论和航空发动机运行核心规律，需要大量的试验迭代验证，国内外公开的成熟应用研究成果较少。航空发动机转子装配堆叠仿真作为典型的专用装配验证优化技术在GE、普惠和罗罗等航空发动机企业得到深入应用<sup>[4]</sup>。孙汕民等人针对航空发动机高压转子部件，研究了堆叠仿真优化技术原理，分析了堆叠仿真软件的应用情况，并指出集成机理模型和智能算法的综合模型是装配精度及性能仿真方面的研究及应用重

点<sup>[5]</sup>。柏树生等人针对航空发动机压气机机匣，基于有限元仿真的方法分析了螺栓紧度分布及加载顺序对机匣装配同心度的影响规律，指出机匣类零件装配过程中通过对称、轮流对螺栓施加相同的预紧力，能保证机匣装配同心度要求<sup>[6]</sup>。潘明辉等针对铆接装配变形开展了有限元仿真和工艺试验验证，为大型薄壁件装配制造精度的提高奠定了技术基础<sup>[7]</sup>。

目前，针对航空发动机装配性能有效检测的方法较为缺乏，其装配质量多数依靠整机试车验证间接得到，但检测效率、周期、成本都不尽如人意。随着航空发动机技术性能指标、质量可靠性、安全性等要求的提高，装配精度或性能仿真作为航空发动机制造企业装配性能检测及验证的核心技术，必将得到广泛深入的研究和发展，与之对应的零部件制造数据库构建、仿真算法开发等研究也应同时得到重视。

### 结束语

数字化虚拟仿真是提升航空发动机

装配质量和效率的有效技术手段，面向航空发动机产品装配全流程，深入研究及应用数字化工艺设计、虚拟装配工艺仿真、装配性能仿真，加快装配工艺仿真与装配技术、检测技术的有机融合，有利于快速提升航空发动机装配的智能化、数字化、自动化水平，减少制造装配过程中的人工犯错因素，提高装配过程的稳定性和可控性。

**航空动力**

（刘志军，中国航发西航，工程师，主要从事数字化设计制造技术研究）

### 参考文献

- [1] 董一巍,李晓琳,赵奇.大型飞机研制中的若干数字化智能装配技术[J].航空制造技术,2016(z1):58-63.
- [2] 曹建国.航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J].推进技术,2018,39(5):961-970.
- [3] 吴腾,吕延全.航空发动机低压涡轮数字化装配仿真[J].计算机测量与控制,2019,27(2):252-256.
- [4] 张渝,李琳,陈津,等.航空发动机重要装配工艺分析及研发展望[J].航空制造技术,2019,62(15):14-21.
- [5] 孙汕民,周烁,高鸽,等.航空发动机装配仿真的关键技术问题[J].航空制造技术,2018,61(22):98-103.
- [6] 柏树生,翟学,艾延廷,等.螺栓连接对发动机机匣装配同心度及动力特性的影响[J].航空科学技术,2010(6):35-37.
- [7] Pan M H,Tang W C,Xing Y,et al.Numerical simulation analysis for deformation deviation and experimental verification for an antenna thin-wall parts considering riveting assembly with finite element method [J].Journal of Central South University,2018,25(1):60-77.