

航空发动机装配仿真的关键技术问题

孙汕民¹, 周 烁², 高 鸽¹, 李 琳²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;
2. 中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 210306)

[摘要] 航空发动机装配是制造过程的终端及核心环节, 具有典型的技术密集、资金密集和高素质劳动力密集特征。装配仿真是提高装配精度、生产效率和水平的重要手段。然而, 传统基于设计模型的几何级装配仿真局限性愈发明显, 面向大量现场工艺决策需求和未来大数据驱动的智能装配线发展趋势, 开展从装配结合面微观接触, 到复杂装配变形预测的物理级建模仿真, 直至面向制造和发动机性能大数据智能关联分析的系统级建模仿真都非常重要和迫切, 对航空发动机装配仿真领域的关键技术问题以及研发工作进行了初步梳理和展望, 并提出了若干建议。

关键词: 航空发动机; 装配仿真; 大数据分析; 装配力学; 工业互联网

Key Technical Issues on Aero-Engine Assembly Simulation

SUN Shanmin¹, ZHOU Shuo², GAO Ge¹, LI Lin²

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;
2. AECC Shanghai Commercial AERO-Engine Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 210306, China)

[ABSTRACT] The aero-engine assembly is the terminal and crucial stage in its manufacturing process, characterized by intensive technology, funds and high-quality labor. Assembly simulation provides the important measures to improve manufacturing accuracy, production efficiency and quality level. However, the traditional geometric-level assembly simulation based on design model encountered limitations more and more. Associating the numerous on-site process decision requirement and the development prospective of intelligent assembly production line driven by big data, it is very important and urgent to develop both the physical modeling and simulation upon: from the micro-scale contact of assembled surface to the complex assembling deformation prediction, and the systematic modeling and simulation upon the big data correlation analysis between manufacture and engine performance. This paper makes preliminary analysis and prospect on key technology issues and development of aero-engine assembly simulation, and provides some suggestions.

Keywords: Aero-engine; Assembly simulation; Big data analysis; Assembly mechanics; Industry internet

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.22.098

仿真是一门基于控制论、系统论、相似原理和信息技术的多学科综合性技术。它以计算机系统和专用设备为工具, 利用模型对实际或设想的系统和过程进行模拟, 是支撑产品研发的重要手段^[1]。装配仿真是指利用工艺要素模型和仿真技术, 在虚拟环境内, 全面模拟产品实际装配过程的技术手段。针对航空发动机装配, 包括部件装配和总体装配, 传统的几何级工艺仿真技术比较成熟, 相关工程应用案例众多, 主要进行干涉检查、工艺规划、厂房布局优化和人机工程学分析。与其他工业产品的装配仿真技术相比, 都是完全一致或高度雷同

的, 属于通用技术应用范畴^[2-3]。

面对航空发动机的高精度、高可靠性装配要求, 基于现场实测数据的工艺优化和快速决策需求, 考虑到复杂薄壁结构的装配变形、环境参数、微观接触、结构动态特性等因素的物理级建模和仿真, 以及面向大数据驱动的数字孪生系统建设和数字化、自动化和智能化发展趋势, 传统装配仿真的技术范畴急需拓展^[4-7]。比如传统数控加工以几何级模拟仿真为主, 假定工件和刀具不变形、无磨损、无温度场作用。因此, 相对物理级仿真, 几何级仿真的技术功能有限。几何级仿真

只能实现理想加工过程的三维展示、路径规划、干涉评估和数控程序初级检查等基本技术功能。

本文分别从面向典型装配结合面和部件的力学仿真、面向装配过程的信息物理系统仿真和面向整机装配和发动机性能的大数据关联建模和仿真3个方面,对先进装配仿真需求和关键技术问题进行初步阐述,并对发动机装配仿真技术研发工作提出建议,展望未来发展趋势。

1 面向典型装配结合面和部件的机理仿真

1.1 典型装配结合面力学建模仿真和专项试验验证

一般商用航空发动机具有数万个零件,数百个装配结合面。因而,只有对装配结合面的物理和结构特性高精度模拟仿真才能解释大量装配组部件的复杂装配变形规律。装配变形主要包括:(1)工装固定和夹持产生结构件变形;(2)环境及冷/热装产生的温度变形;(3)止口过盈挤压变形;(4)螺栓预紧力加载变形;(5)装配部件姿态调整产生的重力变形等。

典型装配结合面力学建模仿真工作包括以下内容:

(1)基于实测数据的界面形貌多尺度重构技术;(2)实测数据与几何模型快速融合的建模技术;(3)工艺-结构-界面关联作用下的结合面接触特性分析;(4)螺栓预紧力形成和松脱特性研究;(5)结合面接触与几何/刚度特性关联分析。大连理工大学和西安交通大学在螺纹连接力学仿真方面具有一定研究进展,图1所示为商发公司和大连理工大学联合开展的某课题研究部分基于实测数据的装配仿真结果。

针对装配结合面的跨尺度建模仿真不仅仅是机理研究工作,为达到一定仿真精度,也需要大量专项试验数据支撑和不断的模型修正完善,在专项试验工作中,主要技术难点在:(1)结合面压力分布测试技术;(2)螺纹预紧力测试技术;(3)结合面刚度测试技术;(4)针对多螺栓连接组件动态松脱特性考核的专项加载试验和测试技术。上述专项试验和测试技术在国际范围内都还不成熟,更没有对应的货架类设备可以直接使用,需要广大科研单位进行专门开发、研制。

1.2 面向现场工艺决策的典型装配部件的装配仿真

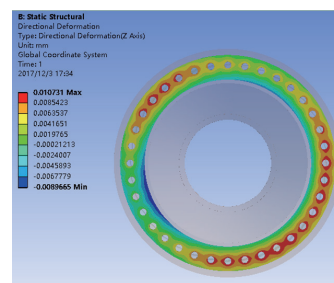
面向装配结合面的物理级建模仿真成果是装配过程仿真的重要基础,但其仿真对象并不是直接用于装配的发动机零组件,故不能直接用于现场装配的指导 and 工艺决策的支撑。同样,传统三维仿真模型因为无法考虑发动机零组件的实测数据和复杂装配变形,其几何级仿真成果也不能有效支撑现场工艺决策。针对装配现场的大量工艺决策,装配仿真的目标主要划分

两个方面:

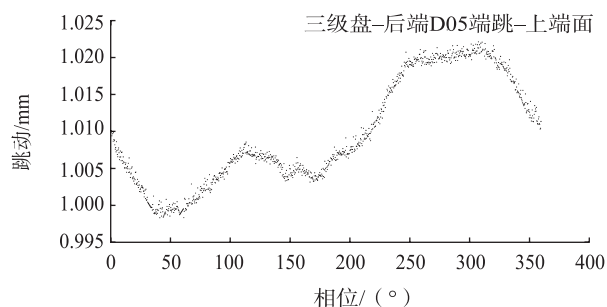
(1)事前决策。根据零件实测的结构数据,如转子零件尺寸、跳动信息和不平衡数据,预测在一定装配工艺参数,如转子零件相对安装相位或者叶片排列顺序下的装配结果;或者根据一定装配指标,如转子组件同轴度或初始不平衡量指标,确定最优的装配工艺参数;最后,也包括在多台份、多备件情况下的选配需求。

(2)事后决策。根据非预期的装配结果,如在装配不合格或异常情况下,判别主要影响因素,如工装夹具安装偏差、发动机结构件变形、设备故障、测试误差和环境参数变化等,支持现场排故和故障诊断。

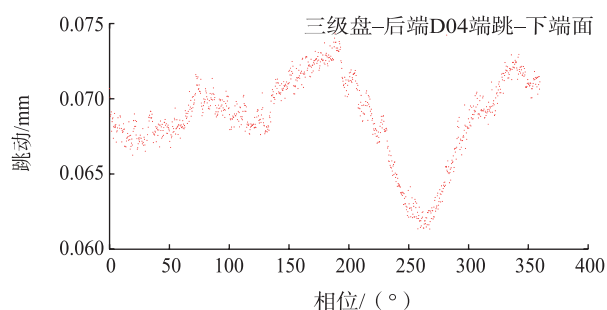
无论事前还是事后的工艺决策,都高度依赖于能够涵盖多样工艺要素和阐释复杂装配变形的高精度、高保真装配过程建模能力和仿真水平。本文以航空发动机



(a) 螺栓安装边应力分布图



(b) 高压压气机转子跳动数据



(c) 界面接触变形特性

图1 高压压气机转子某结合面接触特性研究结果

Fig.1 Contact surface research results of high pressure compressor rotor

核心部件——高压转子部件为例,说明仿真预测和优化的技术原理,以及对工艺决策的支撑作用。高压转子装配现场的工艺决策需求主要体现为:根据实测的转子零件结构数据(几何跳动数据和不平衡量),确定各级转子零件的相对安装相位(关键工艺参数),保证转子组件的同轴度和初始不平衡指标最优。虽然现有堆叠优化算法输出了最终的‘理想’安装相位,但从技术上,针对一定装配相位下的转子同轴度和不平衡结果预测仿真技术才是真正核心,优化算法只是通过多次调用该预测仿真模型,实现了所有安装相位下的装配结果对比和分析,然后将最优装配结果对应的安装相位(即装配工艺参数)在软件界面上输出显示出来。

针对航空发动机典型部件,尤其是转子部件的工艺参数优化工作,一直被行业内广泛关注。国内外相继开发了多个堆叠优化软件,比如第一代的 RPI、SPS 堆叠优化软件,最新一代的 AXIAM “超级堆叠”软件。但是,对于上述工程软件的技术内核——高精度装配仿真预测模型的开发、工程验证和精度确认工作,还没有得到充分重视和深入研究。针对第一代堆叠优化软件,如 SPS 和 RPI 公司开发的通用型堆叠优化装配软件,国发集团内应用并不普及,只有部分主机厂所应用。AXIAM 公司开发的新一代定制型“超级堆叠”软件在国发集团内的应用还是空白,只在国内的两家合资民航大修公司投入使用。然而,第一代堆叠优化软件,少数主机厂所应用效果一般,只是用于提高装配组件的几何特性合格率,没有达到优化目标,更没有形成涵盖几何和不平衡指标的双目标综合优化。重要的是在零件加工偏差较大或在复杂跳动情况下,还要依赖

人工经验决策。一方面,无论第一代的商业化通用型转子堆叠软件,还是最新一代的 AXIAM 公司开发的定制型“超级堆叠”软件,都是将装配仿真预测模型和优化算法完全封装于软件内核,只开发人机界面和数据接口;另一方面,新一代超级堆叠软件的卓越优化性能,完全是依靠具有“装配变形补偿功能”的先进装配仿真预测模型实现的。

国内多家单位(包括哈工大、中国航发动机所、沈阳黎明、商发和若干民航大修厂)的装配一线技术人员都开发了简易化堆叠模型或软件,但是技术验证不充分,精度没有得到确认,模型修正工作非常欠缺。总体上看,国内堆叠优化应用技术水平非常落后,行业内少数单位自主开发的堆叠优化软件刚刚起步,非常零散,没有形成合力,科研资源分散,主要特征是:绝大多数工程技术人员只关注装配工艺参数优化,核心的高精度预测模型构建和修正工作完全是空白状态。

传统人工预测模式的高压转子组件的装配工艺如图 2 所示。

传统的人工预测决策特征:(1)参考零组件的几何跳动、不平衡测量基本信息;(2)普遍以“高低点匹配”或者“轻重点匹配”;(3)不能预测装配后的组件测量结果。使用了堆叠优化软件后,首先实现了基于刚体堆叠模型,针对几何特性指标的装配相位匹配优化。个别软件也实现了兼顾不平衡指标的综合优化,但是根据实际情况看,对具有复杂几何跳动特征的转子零件装配结果预测精度不够理想,主要问题是核心的堆叠预测模型不能有效考虑装配变形,图 3 所示为单目标优化模式的高压转子组件的装配工艺流程简图。

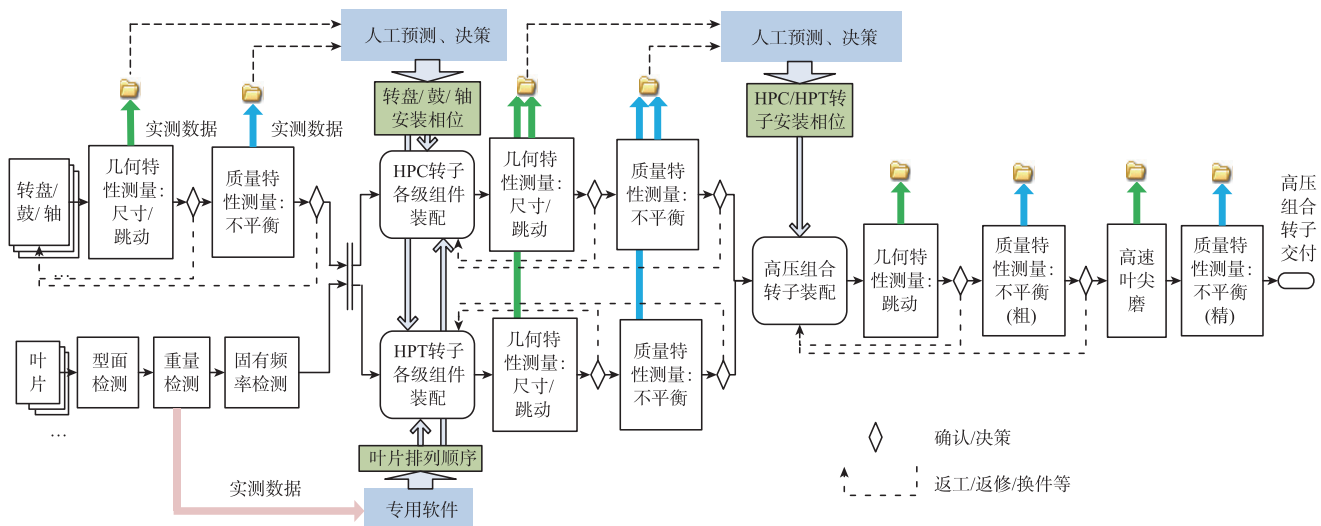


图2 传统人工预测模式的高压转子组件的装配工艺流程简图

Fig.2 Traditional HPC rotor assembly process scheme based on worker prediction

总之,针对装配部件的过程仿真预测或工艺参数优化,包括选配,核心内容都是基于装配结合面微观变形的组部件宏观变形机理建模。对于转子部件,还要在变形预测基础上,增加质量特性(不平衡)预测内容,实现双目标预测和优化。同时,针对装配部件的单纯的力学机理模型会非常复杂和庞大,还需要结合工程需要,开发专用简化算法,比如实现基于现场实测的大数据快速、等效建模。相对装配结合面建模修正工作,部件级建模更需要大量的专项试验支撑和模型修正,补充完善。更为重要的是,单纯依赖机理模型进行现场的特定装配组件结构特征参数,如装配变形,不平衡量结果预测和模拟,功能精度和效率等仍然会有一定差距,所以,支撑机理模型的智能算法是非常必要和关键的。智能算法可以根据机理模型预测偏差,通过历史数据样本的自学习和知识沉淀,使最终预测偏差越来越小,实现对机理模型尚未兼顾的现场复杂工艺要素(如设备、工装、人工操作和环境参数等)造成的装配/测试偏差或不确定性全面覆盖和规律总结。因而,集成机理模型和智能算法的综合模型是大部分工程应用软件中比较优化的架构形式,值得推广应用。

2 面向整机装配过程的信息物理系统仿真

数字化、自动化和智能化是先进制造的大方向和趋势,并集中体现了工业技术和信息技术高度融合的特征。“中国制造2025”上升为国家战略,明确了我国从制造业价值链中低端到中高端的战略转型升级的国家战略。近年来,相关先进制造的大量概念和术语频繁公开于广大新闻媒体、学术期刊和商业论坛,比如“大数

据”、“工业互联网”、“信息物理系统”、“数字孪生”、“工业云”等,在政府、学术界和工业界都得到了广泛关注和热烈讨论^[8-12]。

本文不对上述概念进行详细的辨别和定义,暂且以信息物理系统来定义航空发动机整机装配的数字化工艺技术体系。从航空发动机装配技术需求角度,数字化和智能化是最显著的两个特征,也是当前的数据采集手段落后、工程经验匮乏和知识库支撑严重欠缺的现状决定的。从短期看,自动化需求是存在的;但从长期看,自动化需求至少并不强烈,主要是产能需求和装配制造高可靠性特征决定的,也就是说,装配现场的物理系统在未来不会发生颠覆性变化,但信息系统从无到有,必将迎来迅猛发展机会。信息虚体和物理实体是紧密结合、动态感知并实时交互的两个系统。从人/机/料/环等工艺要素,以及协同制造单位或多个信息化系统之间的相互沟通和信息传递角度,信息物理系统更加体现了工业互联网特征。从虚拟生产建模到现场制造过程的三维映射和同步发展角度,信息物理系统更加体现了数字孪生特征。

本文提出一种面向航空发动机整机装配的信息物理系统架构方案(图4),信息系统包括3个层级,顶层完成面向发动机全生命周期中的大数据分析,实现高级智慧学习和沉淀功能,本文后面会做进一步讲解;中间层完成面向生产过程的工艺要素,如软件、设备和生产流程等的监控/评估/优化/预测任务,实现装配现场的工程经验数字化表达和知识沉淀功能,中间层对应工业互联网的功能层,承载大量专用工业APP,即工程软件,具有准实时性特征;底层实现信息

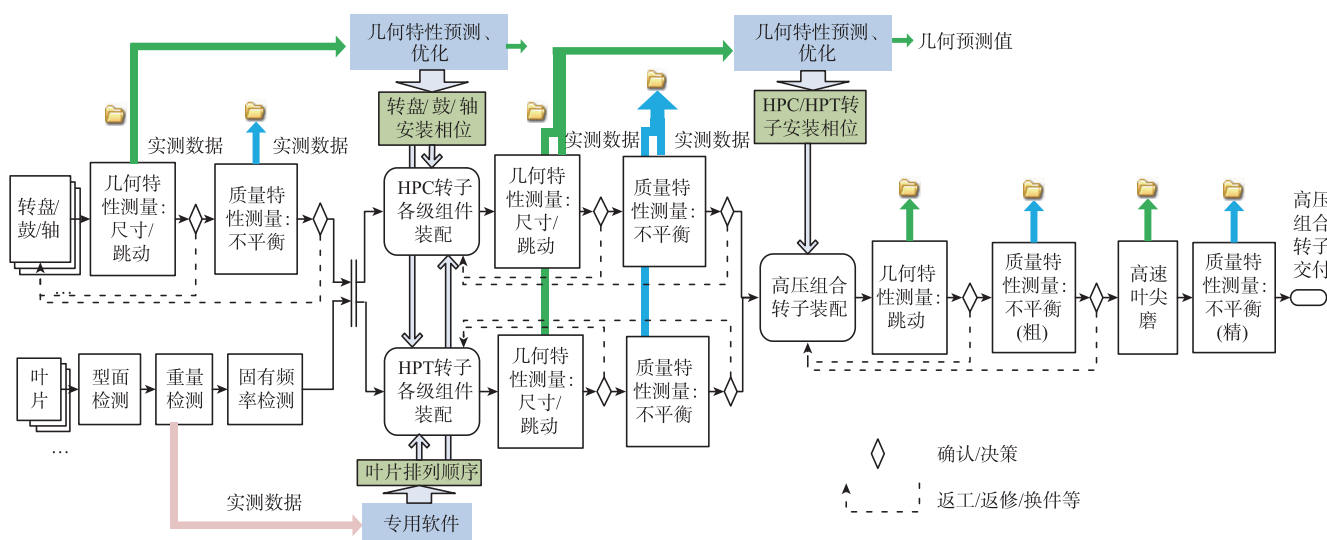


图3 单目标优化模式的高压转子组件的装配工艺流程简图

Fig.3 HPC rotor assembly process scheme based on single target optimization

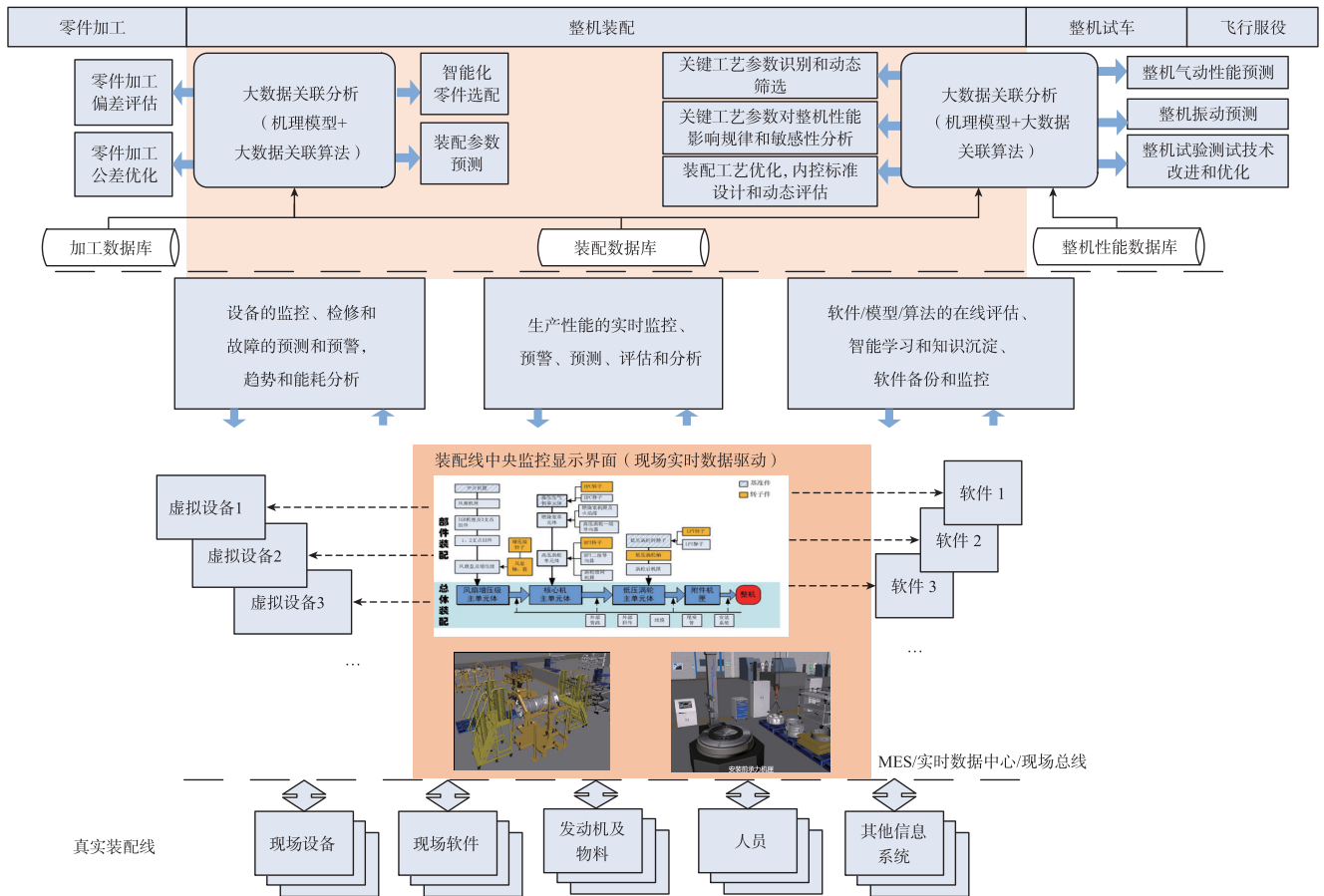


图4 面向航空发动机装配的信息物理系统架构方案

Fig 4 Cyber-physical system architecture of aero-engine assembly line

交互接口、数据驱动的实时三维装配展示和进度可视化功能,底层对应于工业互联网的信息层,具有显著的实时性特征。

使用商业化通用型工艺仿真软件,传统的装配工艺过程仿真主要用于产能/节拍/物流的评估、工艺布局优化、设备利用率和人机工程学分析。面临上述多源异构、多层次、大数据驱动的并具有一下实时性要求的信息物理系统仿真分析需求,传统软件和常规技术方法都面临巨大挑战。当前,国内外针对复杂高端工业产品的信息物理系统或者数字孪生系统仿真技术基础比较薄弱,工程经验也都非常欠缺,主要停留在概念论证和研发探索阶段,另一方面,虽然面向整机装配全过程的系统级仿真是一个重要技术内容,但核心技术仍在信息系统内部的大量专业工业APP上,工业APP是承载知识和经验,满足特定技术需求的工程应用软件,是工艺技术软件化、知识经验数字化的重要成果。信息物理系统与工艺互联网的本质都是:数据+模型=服务,而工业APP技术内核就是模型。

3 面向整机制造和发动机性能的大数据关联建模和仿真

航空发动机整机装配数据和发动机性能参数是密切相关的,但关联规律却是极其复杂的,采用常规的统计方法无法准确、高效地阐释或描述这一规律,而在智能制造信息物理系统架构内的大数据关键建模和自学技术方法可以为此开辟一个新路径,形成新突破。通过大数据建模仿真可以有效指导关键装配工艺参数识别和优化,并实现发动机性能预测。

当然,单纯使用大数据方法需要海量的整机装配和试车数据样本,一般航空发动机型号不满足海量样板需求。因此,使用机理模型,比如整机结构动力学模型,可以将部分的装配过程数据和振动响应快速建立起关联,显著降低大数据分析算法的复杂性,大幅减少传统数据模型在训练学习阶段的样本数量需求。与本文前面提及的“针对装配部件的过程仿真预测技术”一样,机理模型+智能算法是一个综合优化的技术路线。值得关

注的是,当前阶段的整机结构动力学建模仿真考虑的装配过程数据比较有限,主要是转子不平衡量和同心度参数,而关键的装配工艺参数,如转子零件安装相位,还有关键的装配结构参数、转子零件的尺寸和跳动测量结果,都不能直接输入结构动力学模型。传统装配过程只测量结构参数,记录工艺参数,但很少涉及力学参数,如刚度和阻尼。因而,本文阐述的基于结构参数和装配工艺参数的部件装配变形或质量特性仿真预测只是一个基础工作,仅仅用于装配过程中的静态指标预测和工艺优化。为实现发动机振动响应预测,还需对部件力学参数以及运行状态下的时变特性进行建模仿真和专项试验验证。最终,建立基于零件结构参数和装配工艺参数的整机振动预测模型,并通过转子级、部件级和整机级的试验验证,使其满足一定振动响应预测精度和一致性指标,是未来一个重要的技术研究方向。

针对整机装配数据和发动机性能参数的大数据关联和分析涉及内容非常广泛,建议首先以发动机结构性能,即整机振动特性和装配数据进行大数据关联,后期再考虑发动机气动性能。大数据关联建模和分析的技术基础是现有数据的结构化设计,也是难点之一。当然,最大的现实问题是行业内装配数据采集手段比较落后,数据准确性差,人工记录非常普遍,量化数据匮乏,部分数据不完备。

4 结论

(1) 针对航空发动机整机装配建模和仿真工作,多领域、多学科交叉以及与信息化技术紧密结合的特征和发展趋势愈加明显,以干涉检查为代表的几何级装配仿真非常成熟,但功能范围过于有限。以装配部件复杂变形预测的物理级建模仿真,直至面向大数据智能关联分析的系统级建模仿真未来发展重点。

(2) 伴随我国两机专项实施,我国航空发动机行业整机制造的设备、设施包括通用型信息化系统会有突破性发展,实现快速升级改造,但依靠高强度投资驱动的设备改造模式来实现制造能力提升是不可持续的。必须清晰认识到,我国整机装配能力在硬件条件方面并不是非常落后,甚至部分主机厂所的关键装配工艺设备配置水平已经超过国外知名 OEM。在企业软实力方面,如企业文化、管理水平、人工素质以及规范标准,尤其是核心装配技术积累方面差距却是十分显著,因而,需要强大基础理论和丰富工程经验支撑,结合先进建模仿真技术和大量专项试验验证,实现传统工业技术和现代信息技术深度融合和高度集成,达到装配过程的信息采集数字化的工艺技术软件化、经验知识模型化和生产决策智能化目标。

参考文献

- [1] 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.
CAO Jianguo. The research condition, challenge and perspective of aero-engine simulation[J]. Propulsion Technology, 2018, 39(5): 961-970.
- [2] 苟园捷, 常智勇, 莫蓉, 等. 航空发动机装配仿真关键技术研究[J]. 制造业自动化, 2008, 30(1): 1-6.
GOU Yuanjie, CHANG Zhiyong, MO Rong, et al. The key technology research on aero-engine assembly simulation[J]. Manufacture Automation, 2008, 30(1): 1-6.
- [3] 贺芳, 叶洪涛, 赵昌辉. 虚拟装配技术及其在航空发动机行业的应用[J]. 智能制造, 2009(5): 25-26.
HE Fang, YE Hongtao, ZHAO Changhui. The virtual assembly technology and its application in aero-engine industry[J]. Digital Manufacturing Industry, 2009(5): 25-26.
- [4] ZHENG B, YU H D, LAI X M. Assembly deformation prediction of riveted panels by using equivalent mechanical model of riveting process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5-8): 1955-1966.
- [5] HSIEH C C, KONG P O. Simulation and optimization of assembly processes involving flexible parts[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1997, 18(5): 455-465.
- [6] KANG Y G, GUO F Y. A subassembly simulation method with physical deformation and reconstruction of an aircraft[J]. Applied Mechanics & Materials. 2013, 420: 3-8.
- [7] PAHKAMAA A, WÄRMEFJORD K, KARLSSON L, et al. Combining variation simulation with welding simulation for prediction of deformation and variation of a final assembly[J]. Journal of Computing & Information Science in Engineering, 2010, 12(12): 2-7.
- [8] 夏志杰. 工业互联网: 体系与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
XIA Zhijie. Industry internet: architecture and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [9] 谭建荣. 智能制造关键技术与企业应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
TAN Jianrong. The key technology of intelligent manufacturing and enterprise application[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [10] 胡成飞. 智能制造体系构建[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
HU Chengfei. The intelligent manufacturing architecture building[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [11] ANAGNOSTOPOULOS I, ZEDADALLY S, EXPOSITO E. Handling big data: research challenges and future directions[J]. The Journal of Super Computing, 2016, 72(4): 1494-1516.
- [12] ASSUNCA M D, CALHEIROS R N, BIANCHI S, et al. Big data computing and clouds: challenges, solutions, and future directions[J]. Journal of Parallel & Distributed Computing, 2013, 8(3): 3-15.

通讯作者: 周烁, 研究员, 研究方向为先进装配技术和工艺装备, E-mail: zhoushuo1975@163.com。

(责编 铃兰)