

航空发动机重要装配工艺分析及 研发展望

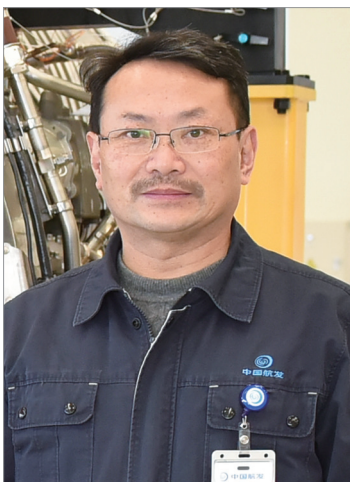
张渝,李琳,陈津,史新宇,周烁

(中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司,上海 200241)

[摘要] 在全球新一轮科技革命和产业升级迅猛发展、我国确立创新驱动国家战略、装备制造业转型升级的大背景下,如何实现以劳动密集为特征、人工经验为主导的航空发动机传统装配制造模式向数字化、自动化和智能化为特性的先进制造模式转化,在更高层次上提升装配精度、一致性、可靠性和效率指标,在发动机产品全生命周期内发挥更大作用,不仅是一个重要的航空发动机行业战略发展问题,也是作为“工业皇冠上明珠”为其他高端装备产品的整机制造升级提供示范引领的责任目标。基于航空发动机装配工艺技术发展现状,对比分析国内外差距和主要问题,提炼基础研究和工程应用研究需求,并对后期装配技术研发工作提出构想和建议,期待为航空发动机装配工艺优化升级、相关课题立项论证提供参考和启发。

关键词: 航空发动机;智能装配;测量技术;建模仿真;自动化;基础研究

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.15.014



张渝

中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司总经理,上海商用航空发动机先进工艺与智能装配工程技术研究中心主任,研究方向为航空发动机零部件制造和总装试车。

航空发动机整机装配工艺涵盖从所有零件、成附件到各级组件、单元体、主单元体直至整机的全部装配和分解过程,也包括装配分解过程中的转子零组件平衡、各类检测(试验和测量)、清洗和油封存放等技术活动,所以需要大量的通用/专用工装夹具、标准/专用设备和厂房设施支撑,也需要相当数量的耗材/品、动力和人力开支。比如,一般成熟民用发动机零件级装配所需的专用工装夹具在 500~1000 件套之间,工艺设备种类大约在 30~50 种之间。因而,航空发动机整机装配与其他大型高端装备产品一样,作为制造终端环节,具有显著的技术密集型、资金密集型和高素质劳动密集型特征,相对一般工业产品,比如汽车整车,航空发动机装配质量对人工经验的依赖

性要明显大一些。鉴于航空产品的高安全性需求特征,航空发动机装配制造更加强调装配精度、一致性和可靠性指标,而对于生产效率指标要求并不严格。

我国航空发动机装配工艺技术发展概况

作为少数发达国家的战略级尖端科技装备产品,航空发动机研发技术,特别是整机级设计和制造技术一直被高度封锁和严格保密。通过对三大标杆企业(GE、普惠和罗罗)公开的技术成果、宣传资料收集整理,以及和他们的各级供应商技术交流,并结合专利、学术论文查询结果分析,仅仅可以获得少量相关信息。针对整机装配工艺技术领域,总体上看,标杆企业的装配技术和生产

管理体系非常成熟,重点体现在标准规范、基础数据库、数字化工艺设计和专用装配软件方面,比如考虑装配变形的三维尺寸链设计和装配工艺仿真软件、面向多目标优化的叶片排列计算程序、基于转角和扭矩双目标控制的高性能螺纹拧紧工艺方法,特别是转子堆叠优化(也称直线装配)软件应用非常普及。近年来,美国 AXIAM 公司开发的新一代定制型“超级堆叠”软件,并将其集成于精密转台设备,形成第二代转子装配平台系统,已经实现快速推广^[1]。在工艺装备方面,首先是航空发动机装配专用工艺装备研发和工程化应用进展显著^[2-5],比如:小型数字化涡轮喉道面积检测装置、检测转静子相对同轴度的 Linipot 测量系统、深入转子内腔的多自由度螺母拧紧机器人、具有整机和大部件多自由度调姿功能的专用运输车或 AGV、小涵道比涡扇发动机多自由度翻转装备,基于上部运输的多条脉动式发动机总装生产线已经投入使用。其次是大量先进的通用型设备广泛应用于整机装配现场,比如:具有无线数据传输和实时报警功能的高精度电动拧紧枪、发动机外部结构的光学检测机器人、气动助力臂、智能货柜或全自动垂直升降库。

伴随着国家重大专项实施,以及多型号发动机相继启动立项研制或者进入批产/服役维修阶段,总体上我国航空发动机整机装配的技术水平和生产规模在近年来得到一定提升和拓展,但是与三大标杆企业相比,装配制造技术能力差距还是显著的,主要体现在:(1)装配技术基础薄弱,机理不清,装配工艺正向设计和验证能力不足,对国外成熟发动机维修资料参照和依赖性较强。面向装配现场的建模仿真、优化分析类软件严重匮乏,特别是适合我国航空发动机零件材料性能和加工制造水平的专用装配软件开发工作处于空白

状态,排故和工艺决策缺乏模型、知识库支撑^[6-10]。(2)专用工艺装备研发及工程应用进展缓慢,仍然以仿制和跟踪为主^[11]。行业内多家单位委托专业国外供应商,定制了小型数字化涡轮喉道面积检测装置,国内的小涵道比涡扇发动机多自由度翻转装备仍然处于方案论证阶段,某发动机的高压转子自动化螺纹紧固机器人研发项目刚刚启动,某大涵道比涡扇发动机的脉动生产线主体装备研制取得一定进展,但行业内依然没有一条完整的脉动式装配生产线投入使用。

后文将从航空发动机装配制造工艺技术的 4 个维度,进一步阐述分析,结合行业发展现状、痛点问题,提炼相关的基础技术和工程应用技术研发需求,并对后期装配技术研发工作提出构想和建议。

航空发动机装配工艺技术 及研发需求

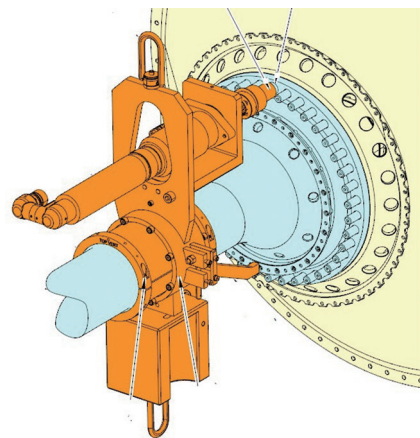
1 装配连接工艺技术

1.1 行业内相关技术发展现状

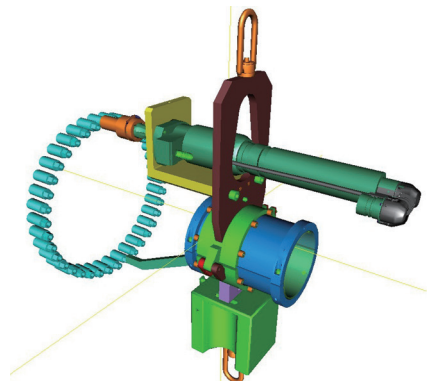
螺纹连接作为航空发动机最基本的装配连接方式,其连接质量,如预紧力精度、松脱特性直接决定了发动机装配组件的结构变形和外部尺寸、连接刚度、整机的气动和结构性能,以及服役阶段的寿命、可靠性和耐久性等综合指标。国外的先进发动机,螺纹连接工艺技术基础扎实、标准齐全、考核验证充分,突出表现是关键部位螺栓拧紧工艺都非常复杂,体现在对拧紧顺序、拧紧遍数、每遍拧紧幅度、拧紧速度、润滑条件和保持时间等多个指标进行了全面记录和控制。国外某在役型号发动机低压涡轮轴连接螺母装配,规定首先使用十字交叉法将工艺螺母拧到 $61\sim 75\text{N}\cdot\text{m}$,然后使用发动机螺母替换工艺螺母,同样使用十字交叉法拧到 $61\sim 75\text{N}\cdot\text{m}$;然后安装电动拧紧装备,如图 1 所示,用转角扭矩法将螺母

以设定的速度拧紧到 $129\sim 142\text{N}\cdot\text{m}$,继而旋转 $73^\circ\sim 77^\circ$;最后对螺母反转 3 圈,再参考上述步骤用转角扭矩法对螺母进行最终限力,确认所有参数在规定范围内后,完成所有拧紧工序。国外另一在役型号发动机的高压转子连接螺母也采用了复杂的转角扭矩法拧紧工艺,转角范围 $42^\circ\sim 46^\circ$,力矩范围 $127\sim 339\text{N}\cdot\text{m}$ 。对于最新服役的某先进发动机,高压转子连接螺母安装已经采用了高精度、多自由度自动化拧紧装备,在完成复杂转角扭矩法(转角范围 $74^\circ\sim 78^\circ$)拧紧工艺控制基础上,实现了在强限制性空间内的螺母自动上下料、自动定位、实时监控、异常报警功能。

国内航空发动机行业普遍存在着螺纹拧紧机理不清晰、检测手段不



(a) 电动拧紧设备安装状态



(b) 电动拧紧设备结构

图1 国外某在役型号发动机低压涡轮轴连接螺母装配专用装备

Fig.1 Special tooling of LPT shaft nut installation for one foreign on-service engine

到位和工艺验证不充分的现象,仍然以扭矩控制为唯一目标,在复杂拧紧工艺正向设计、预紧力测试和螺纹松脱特性的考核和验证方面,技术积累非常有限。相当一部分的重点型号发动机关键螺纹连接件的拧紧工艺设计参考国外维修手册,没有针对我国紧固件材料差异、机加工和热处理等工艺特殊性专门开展关键部位的螺纹拧紧工艺正向设计和测试验证。部分装配工艺技术人员对转角扭矩法、贴合力矩概念,以及预紧力和松脱特性测试的技术原理了解不够深入。

2018年以来,中国航发商发制造公司联合大连理工大学针对某发动机若干部位的螺栓螺母,开展了部分拧紧工艺建模仿真工作,使用相当数量的发动机真实螺栓和螺母实物,并研制专用试验测试设备,进行了机理探索性试验和仿真验证工作。初步研究发现:(1)某型发动机低压涡轮轴螺纹连接件,按照扭矩法采用人工+扳手拧紧的螺纹预紧力偏差9.54%,按照扭矩法采用自动化电动扭矩扳手的预紧力偏差4.72%,按照扭矩转角法采用自动化电动扭矩扳手的预紧力偏差4.4%。使用自动化电动扭矩扳手,某静子机匣螺纹连接预紧力平均偏差20%以上,采用转角扭矩法后,平均偏差降低至10%以内。(2)螺母扭矩限力最后阶段,输出扭矩主要克服端面摩擦。端面摩擦系数增加显著,是多次拧紧试验中预紧力降低的主要原因。(3)拧紧速度对螺栓预紧力平均值影响较小(相差不超过100N),但对预紧力分散性具有一定影响,建议按照8r/min拧紧时预紧力偏差最小。(4)针对回转体安装边的多螺栓拧紧时,起始螺栓位置的选择非常重要。尤其在单高点和双高点的两种典型几何形貌时,首个拧紧螺栓的选择不科学会引起明显的安装边多余变形和内应力。(5)镀银螺母具有较大摩擦系数,未

润滑条件下同样输入扭矩,下预紧力偏低,且拧紧过程中镀层易剥落。图2和图3为部分仿真计算和试验测试结果。然而,从发动机行业的螺纹紧固技术总体研究进展看,无论是机理成果还是工程验证都非常有限,特别是发动机关键螺纹连接件的动态松脱试验研究在国内还是空白。

1.2 基础技术和工程应用技术研发需求

鉴于螺纹紧固机理高度复杂,影响因素众多,行业内相关研究基础薄弱,建议航空发动机装配连接技术研发方向如下:(1)航空发动机典型螺纹连接件的预紧力形成及动态松脱机理;(2)高性能螺纹拧紧工艺设计、仿真和专项试验技术;(3)非粘贴式高精度超声波螺纹预紧力检测技术研究;(4)典型装配组件的多螺栓拧紧技术状态评估和检测技术;(5)自

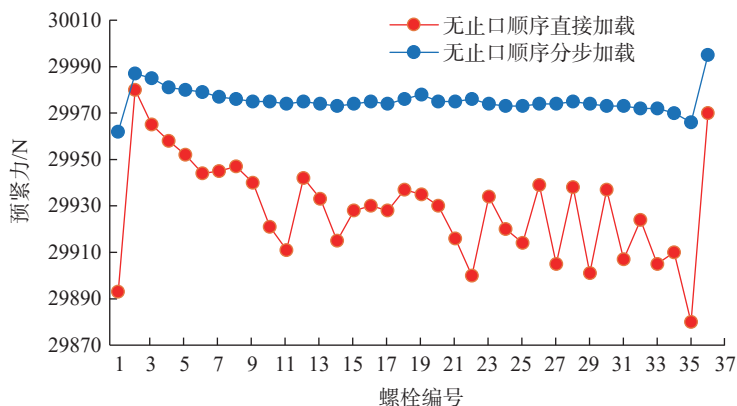
锁螺母技术状态评估和使用寿命预测技术;(6)全工况模拟的螺纹连接件动态松脱特性(加速)试验技术和评价标准研究。

针对当前行业内主要螺纹紧固工艺技术问题,结合发动机产品服役性能需求,建议航空发动机装配连接的工程应用技术研发方向如下:(1)基于机理模型和经验数据库的高性能拧紧工艺参数设计软件;(2)发动机服役阶段的关键部位螺纹预紧力衰减规律和评价标准;(3)面向转子内腔螺纹连接件的专用自动化拧紧机器人研发;(4)面向批产的通用型螺纹连接件自动化拧紧平台开发。

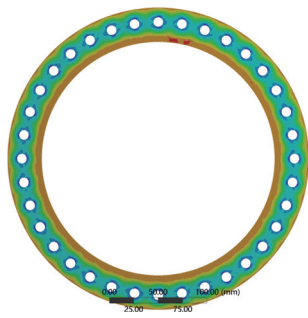
2 装配建模仿真技术

2.1 行业内相关技术发展现状

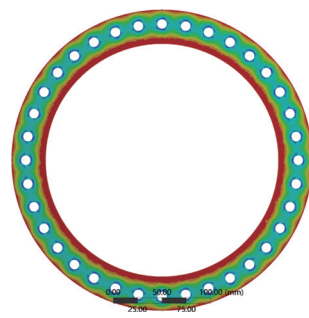
仿真是一门基于控制论、系统论、相似原理和信息技术的多学科综合性技术,它以计算机系统和专用设



(a) 无止口法兰不同加载步数预紧力分布



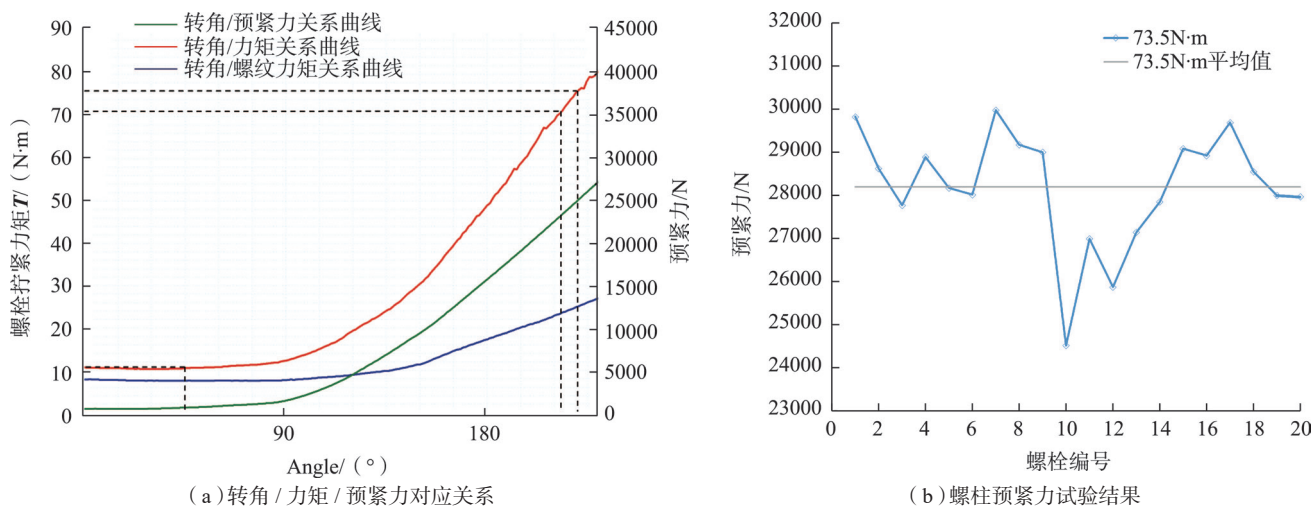
(b) 加载50%预紧力安装边应力分布



(c) 加载100%预紧力安装边应力分布

图2 加载步数对残余预紧力及安装边应力分布影响的仿真分析

Fig.2 Simulation on residual tightening force and flange strain by torquing procedure



(a) 转角/力矩/预紧力对应关系

(b) 螺栓预紧力试验结果

图3 预紧力形成的试验曲线及多螺栓预紧力测量试验结果

Fig.3 Results of one nut and multi-nut tightening force measurement

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],因此仿真工作的基础和核心是建模。传统的几何级装配工艺仿真技术比较成熟,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,使用的仿真模型是三维设计模型,不能反映制造偏差和复杂装配变形。然而,面对航空发动机装配制造的高精度、可靠性和现场快速工艺决策需求,考虑装配变形、环境参数、微观接触等因素的物理级装配建模仿真,以及衍生的工艺参数优化技术逐步成为了整机制造的核心技术,显现了重要工程价值^[12]。

针对航空发动机整机制造最为典型的专用装配软件——转子装配工艺参数优化(堆叠优化或者直线装配)软件,在三大标杆企业内被广泛应用。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,国内发动机行业应用并不普及,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”软件在航发集团内的应用还是空白,只有在国内的两家合资民航大修公司投入使用。然而,有关第一代堆叠优化软件,少数主机厂所的应用效果一般,只是用于提高装配

组件的同心度合格率,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AXIAM公司开发的最新一代的定制型“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。

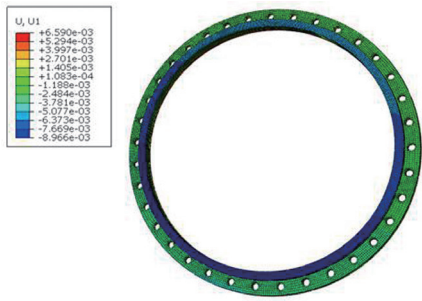
国内多家航发单位的装配技术人员都开发了简化堆叠模型或软件,然而技术验证不充分、精度没有得到确认、模型修正工作非常欠缺。总体上看,国内堆叠优化技术水平非常落后,行业内少数单位自主开发的堆叠优化软件刚刚起步,非常零散,没有形成合力,科研资源分散,主要特征是:绝大多数工程技术人员高度关注转子装配工艺参数优化,但核心的高精度装配仿真模型构建、专项试验和模型修正工作,国内完全处于空白状态。商发制造公司联合大连理工大学、西安交通大学开展了基于零件实测几何数据的装配力学仿真和预测技术研究,图4为某转子安装

边在螺纹预紧力、止口过盈作用下的应力分布仿真结果。图5为某高压转子缩尺模拟件几何跳动测量、动平衡现场照片。图6为缩尺模拟转子在不同装配相位下,转子同心度和不平衡量的预测值与实测值的对比结果。相关专项试验验证工作会在后期持续开展,但距离形成一定技术成熟度的工程化应用目标还很遥远,尤其当转子加工精度较低时,仿真预测的精度大幅下降。

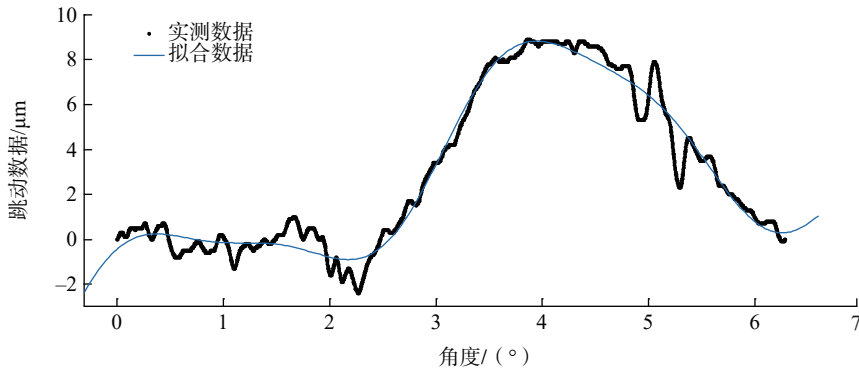
2.2 基础技术和工程应用技术研发需求

鉴于物理级的装配仿真涉及复杂力学理论和建模方法,并需要大量专项试验验证和模型修订,相关工作刚刚起步,建议基础技术研发方向如下:(1)具有止口定心的螺栓连接安装边快速建模和变形仿真技术;(2)航空发动机安装边应力分布及刚度测试技术;(3)航空发动机典型零组件装配变形机理和仿真预测技术;(4)转子装配组件的几何和不平衡特性形成及关联机理。

鉴于航空发动机装配变形极其复杂,可能来源于工装固定和夹持、环境及冷/热装产生温度变化、不规则止口过盈挤压、螺栓预紧力偏差和装配部件姿态调整等,现场工艺决策缺乏机理模型和经验指导,建议工程



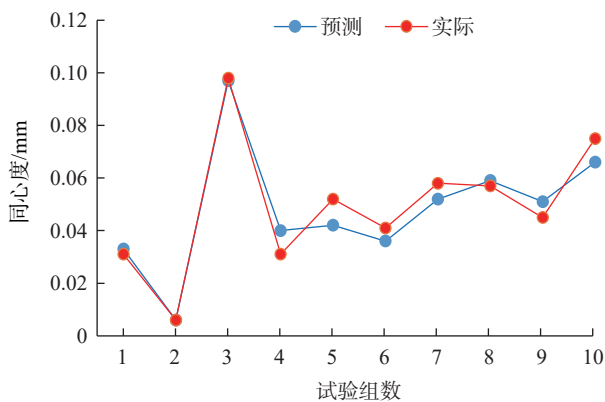
(a) 转子安装边装配变形仿真结果



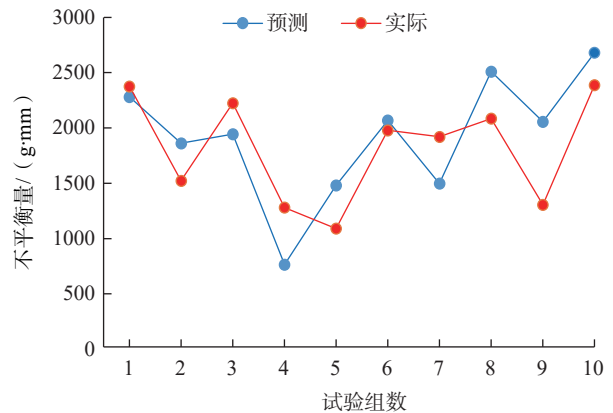
(b) 凹止口形貌拟合曲线

图4 某发动机转子安装边变形仿真结果和端向跳动实测曲线

Fig.4 One engine flange deformation simulation and measured runout results



(a) 不同装配相位下模拟转子同心度预测值与实测值对比



(b) 不同装配相位下模拟转子不平衡量预测值与实测值对比

图6 某缩尺模拟件在10个装配相位下的同心度、不平衡幅值预测结果

Fig.6 Concentricity and unbalance prediction results of one reduced scale rotor at 10 assembled phase



(a) 缩尺模拟转子几何跳动测量



(b) 缩尺模拟转子动平衡试验

图5 某高压转子缩尺模拟件几何跳动测量、动平衡现场照片

Fig.5 Geometry runout and unbalance measurement in situ photo of one reduced scale rotor

应用技术研发方向如下:(1) 基于现场实测数据和仿真模型的典型装配组件变形预测软件开发和专项验证;(2) 双目标优化的转子零件加工偏差评估、选配软件开发和专项验证;(3) 转子装配相位综合优化技术;(4) 基于磨削加工数据和机理模型的转静子间隙预测和控制技术。

3 装配过程检测技术

3.1 行业内相关技术发展现状

装配过程中检测内容较广,涵盖各类机械物理参数的测量和试验,是装配质量监控的重要手段,所以装配过程的检测项目种类、精度和效率直接决定了装配技术能力和生产指标^[13-15]。常规性装配过程检测主要包括几何特性(如尺寸、跳动、三维形貌、同心/轴度等)、质量特性(如转子不平衡量、叶片重量/重量矩和整机质心等)和力学特性(螺栓拧紧力

矩、可调机构卡滞力等)参数的测量或试验。其他专项检测包括轴承游隙、腔体密封性、涡轮喉道面积、锥齿轮印痕和电气系统各类电学参数测量等。

常规检测项目,尤其是几何特性参数测量的装备和技术方法相对成熟,国内外差距不大。几何特性参数一般使用气浮精密转台、三坐标测量设备和各类通用型或定制型量具。

三坐标测量设备广泛应用于工业制造领域,无论是传统的固定桥架式或新型的移动关节臂式三坐标设备在功能范围和精度指标上都全面满足了现场需求。但值得关注的是,行业内广泛应用的气浮精密转台依然存在优化升级和功能拓展的需求。图7为典型气浮精密转台构型图,首先,精密转台只能测量回转体端面和径向跳动,无法测量宏观几何尺寸,如高度和直径等;其次,精密转台刚度有限,不能完成装配工作,导致转子组件装配过程中需要频繁在精密转台和装配座工装之间往返拆装、调试;最后,发动机转/静子的安装边几何形貌复杂,尤其是试车后会有一定变形,但精密转台只能测量安装边局部跳动,测头必须绕开螺栓孔,一个测头的测量结果只是在特定直径的一个圆周线跳动数据,不能反映径向跳动变化和局部凹凸信息。近年来,光学测量技术比较成熟,精度指标不断提升,但一直没有应用于发动机装配领域中的精密转台设备,无法形成安装边配合面的全三维几何形貌测量。

相对于常规检测项目,国内发动机行业在专项检测技术研发和应用方

面比较落后,比如使用空气介质的高精度流量/密封性检测设备、Linipot转静子相对间隙测量装置、小型数字化涡轮喉道面积检测装置,尤其是基于光学的复杂几何型面、表面损伤检测设备,国外标杆企业都已进入工程应用阶段,国内仅仅处于研发或测仿阶段,工程应用经验还非常欠缺。

伴随无损检测技术和整机装配力学研究的快速发展,结合高性能装配和整机振动排故需求,针对关键装配部件力学特性指标(如安装边连接刚度、转子组件整体刚度、主支点支承动刚度或动阻尼等)的现场检测技术研发日益受到关注,当前国内外都处于探索性的预研阶段。

3.2 基础技术和工程应用技术研发需求

航空发动机装配过程检测技术种类繁多,各类数字化检测技术发展迅猛,结合当前发动机装配检测难点和主要问题,建议工程应用技术研发方向如下:(1)一体化多功能的复合测量转台研制;(2)强限制性空间内高精度光学检测专用机器人研制;(3)涡轮导向器三维流道光学检测装备研制及计算软件开发;(4)整

机转静子间隙、同心度检测技术及专用装备;(5)复杂几何调节结构的几何及力学性能指标检测技术;(6)含液压加载和旋转驱动功能的锥齿轮啮合印痕光学自动化检测系统研发;(7)关键部件结构动态特性形成机理和检测技术基础研究。

4 转子平衡工艺技术

4.1 行业内相关技术发展现状

转子是航空发动机核心部件,涵盖零件到各级组件的静/动平衡,直至整机平衡的转子平衡工艺技术也是整机装配制造技术体系中的核心内容。总体上看,从小型柔性转子(工作转速超过一阶弯曲临界转速)到大型准刚性转子(工作转速低于一阶弯曲临界转速)平衡工艺方法及装备都比较成熟,国内外差距不大。但在平衡机理研究和平衡工艺技术标准的构建及优化方面,国内落后明显,突出表现为:(1)从转子零件的原始不平衡量到转子组件的初始、最终不平衡矢量控制要求或工艺内控指标设计和修订,缺乏充分的机理支持和专项工艺验证,对成熟发动机技术标准和人工经验依赖性较强。(2)转子组件的几何和质量特性参数关联规律不清晰。国外某先进发动机的高压涡轮转子与高压压气机转子装配后同心度限制值为0.05mm,超过该值需要拆卸高压涡轮转子,如果实际测量值位于0.03~0.05mm时,需要根据一定算法在规定截面安装平衡配重,进而保证整机振动水平。国内对组合转子最终装配的几何偏差引发的不平衡增量仿真和专项试验研究还处于探索期。尤其是在科研阶段,零件加工制造水平有限,相当部分的转子安装边几何跳动在0.03mm以上,单纯零件不平衡构成的组件不平衡量只占一小部分,大部分是几何偏差引发的二次不平衡量。(3)基于整机振动响应的高压转子配平(整机平衡)技术,机理相对简单,但国内专项试验严重不足,没有实现型号

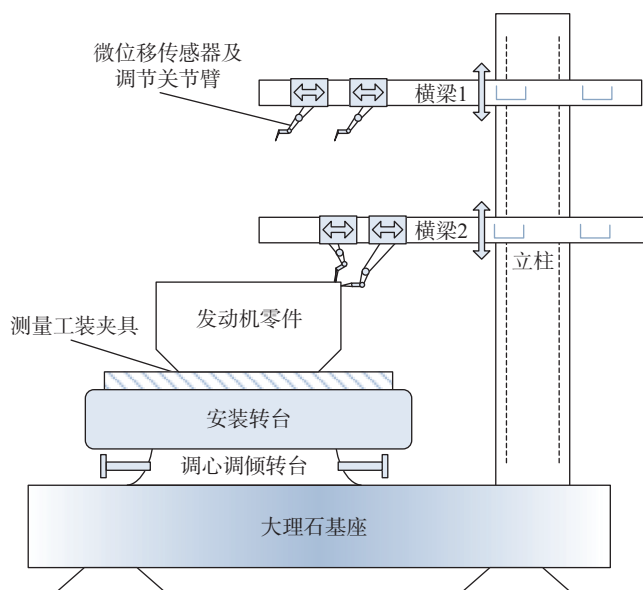


图7 典型气浮精密转台构型示意图

Fig.7 Typical configuration illustration of air floated turn table

应用和技术标准。某国外民机建立了高压组合转子的整机平衡技术方法,实现在特定转速范围内的高压基频振动超限后,只需拆卸局部少量外部结构和一半前静子机匣,无需分解轴承,通过调整高压压气机 4/9 级叶片根部配重的方法,使整机振动响应达标。国内一般采用三点法或矢量法,在风扇或低压涡轮转子上应用了整机平衡技术。

4.2 基础技术和工程应用技术研发需求

面向未来发动机的高转速、低振动和高可靠性需求,正视国内外转子平衡工艺技术的主要差距,建议基础技术和工程应用技术研发方向如下:(1) 转子组件的不平衡特性参数形成和演变机理;(2) 大尺寸叶片的多目标优化排列算法开发和工程验证;(3) 准刚性转子的动平衡机理和振动控制技术;(4) 动平衡模拟转子的设计及制造技术;(5) 特殊构型转子的复杂专用平衡工装研制关键技术;(6) 高压组合转子整机平衡技术及控制标准。

结论及展望

伴随我国航空发动机在役性能保障、提升和增寿,以及多型号新机研发全面快速推进,整机装配数字化、自动化和智能化发展需求日益强烈。在数字化发展方面,除了数字化装配工艺设计、仿真平台软件和 MES 等支撑性装配信息化系统建设需求以外,装配技术层面,数字化信息采集需求最为强烈,主要体现在当前工艺条件下数字化测量数据少、测量数据不准确,比如,大部分单位的转子安装边径向和轴向跳动仅记录了周向均布 8 点数据,绝大多数单位没有记录转子盘轴件的最终安装相位这类重要工艺参数;转静子间隙、涡轮喉道面积的测量精度低,对人工经验依赖性较强,特别是喉道面积只能测量名义值。在自动化发展

方面,一般性自动化应用需求比较普遍:主要使用通用型自动化设备,如 AGV、助力臂,或者使用标准关节臂机器人+执行器或检测仪的典型自动化装备开发模式,可以完成批量式叶片综合检测(叶片三维几何形貌、重量、重量矩或固有频率参数等)、批量式螺母自锁力矩检测、批量式自动化螺母拧紧,主要解决提升效率和降低劳动强度的问题。但伴随先进构型的新机研制和重点批产型号产能大幅提升,能够解决关键工艺技术难点或瓶颈问题的专用型自动化工艺装备开发需求日益突显,特别是强限制性空间内的高精度装配或检测类机器人研制,已经成为行业内自动化应用技术的发展重点。在智能化发展方面,航空发动机整机装配需要高度关注现有人工经验的知识化表达或建模,装配过程海量数据的智能化分析和学习,产品性能数据与装配过程数据的关联分析,关键装配工艺参数的智能化识别,基于历史数据样本和经验模型的装配结果和产品性能预测。

我国航空发动机整机装配工艺技术研发,需要面向以数字化、自动化和智能化为特性的先进制造未来发展趋势,也必须从现有问题出发,充分考虑限制性因素。一方面,由于国内高端航空材料性能和机加水平有限,多个在研和批产发动机的新交付或服役后关键零件几何精度较低、稳定性较差,甚至超差问题比较严重。国外发动机零件超差极少,转子零件跳动一般在 0.01mm 以内,所以转子组件装配实现了真正的堆叠优化目标,国内转子装配还是以合格率为主要控制目标。另一方面,国内航空发动机结构设计阶段提出的装配技术要求依然不够全面或者科学,比如对关键部位的螺纹连接结构只有扭矩控制,没有国外成熟发动机采用的转角指标控制。另外,扭矩公差要求过于苛刻,国内现有制造条件很难

或者无法实现。更需要装配技术人员主动参与和反哺结构设计,实现装配技术要求不断补充和完善。

综上,建议整机装配工艺技术研发从 3 个方面并行开展,首先是夯实技术基础,以装配力学仿真和专项试验研究为主要内容,重点开展复杂装配变形、转子结构参数(几何、质量和刚度特性)的形成和关联机理研究。其次是关键技术攻关,结合基础技术研究成果和工程经验,解决当前研发及批产维护中的技术难点和瓶颈问题,并完成基础技术成果的最终工程验证。最后是先进技术探索和储备,以智能装配为主要目标,特别是深度挖掘装配制造的技术价值和知识贡献,比如基于装配知识库或机理模型的发动机结构优化设计、零件加工偏差量化评估、基于零件加工数据的智能选配和修配、装配制造和发动机性能的大数据关联建模和智能学习。最终达到装配过程的信息采集数字化、重要工序自动化、工艺技术软件化、经验知识模型化和技术决策智能化的目标。

参考文献

- [1] HUSSAIN T, YANG Z, POPOV A A, et al. Straight-build assembly optimization: a method to minimize stage-by-stage eccentricity error in the assembly of axisymmetric rigid components (Two-Dimensional Case Study)[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133(3): 031014.
- [2] SICH J H, PIERCE C M. Flexible manufacturing systems at GE aircraft engines: the right choice at the right time[C]//Proceedings of the Symposium on Flexible Automation Part 2. New York: ASME, 1992.
- [3] PAPASTATHIS T, RYLL M, BONE S, et al. Development of a reconfigurable fixture for the automated assembly and disassembly of high pressure rotors for Rolls-Royce aero engines[C]//RATCHEV S. Proceedings of 5th IFIP WG 5.5 International Precision Assembly Seminar. Berlin: Springer, 2010: 283-289.
- [4] 孙贵青,王彤,吕玉红. 涡扇发动机先进装配工艺与装备[J]. 航空制造技术,

2017, 60(22): 72-77.

SUN Guiqing, WANG Tong, LÜ Yuhong. Advanced process and equipment for turbofan engine assembling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(22): 72-77.

[5] 辛彦秋, 吴斌, 苏丹, 等. 民用航空发动机脉动装配浅析[J]. 航空制造技术, 2013, 56(20): 118-120.

XIN Yanqiu, WU Bin, SU Dan, et al. Introduction of pulse line for commercial aero-engine assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(20): 118-120.

[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.

BAI Shusheng, ZHAI Xue, AI Yanting, et al. The influence of bolted connection on the coaxial tolerance and dynamic analysis in aero-engine casing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2010(6): 35-37.

[7] 刘君, 吴法勇, 王娟. 航空发动机转子装配优化技术[J]. 航空发动机, 2014, 40(3): 75-78.

LIU Jun, WU Fayong, WANG Juan. Optimization technique of aeroengine rotor assembly[J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 75-78.

[8] 王波, 李曙光. 装配优化技术在某型航空发动机高压压气机转子装配中的应用[J]. 航空维修与工程, 2016(6): 51-53.

WANG Bo, LI Shuguang. Application on assembly optimization technology in the

assembly of engine high-pressure rotor[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016(6): 51-53.

[9] 李明, 陈大丽, 朱颖. 装配刚度不均匀性对航空发动机整机振动的影响[J]. 价值工程, 2014(16): 65-67.

LI Ming, CHEN Dali, ZHU Ying. The influence of assemble uneven rigidity on vibration of aero engine[J]. Value Engineering, 2014(16): 65-67.

[10] 沈献绍, 范强, 柏树生, 等. 基于BP神经网络的航空发动机装配参数对整机振动影响的研究[J]. 航空维修与工程, 2012(1): 70-73.

SHEN Xianshao, FAN Qiang, BAI Shusheng, et al. The effect of aeroengine assembly parameters on the whole body vibration based on BP neural network method[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2012(1): 70-73.

[11] 魏企业, 石宏, 孙方成, 等. 航空发动机转子装配螺栓自动拧紧机设计与分析[J]. 机械, 2017, 44(6): 67-70.

WEI Qiye, SHI Hong, SUN Fangcheng, et al. Design and analysis of aero engine rotor automatic bolt tightening machine structure[J]. Machinery, 2017, 44(6): 67-70.

[12] 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.

SUN Shanmin, ZHOU Shuo, GAO Ge, et al. Key technical issues on aero-engine assembly simulation[J]. Aeronautical Manufacturing

Technology, 2018, 61(22): 98-103.

[13] 王晓梅, 张春青. 航空发动机机匣同轴度的测量与调整[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 76-80.

WANG Xiaomei, ZHANG Chunqing. Measurement and adjustment of aeroengine casing concentricity[J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 76-80.

[14] 张小丽, 王保建, 陈雪峰, 等. 航空发动机可拆卸盘鼓型转子拉杆螺栓装配紧度辨识方法[J]. 航空动力学报, 2015, 30(8): 1967-1974.

ZHANG Xiaoli, WANG Baojian, CHEN Xuefeng, et al. Stay bolt assembly tightness identification method for dismountable disk and drum rotor of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(8): 1967-1974.

[15] 张子阳, 谢寿生, 彭靖波, 等. 基于非线性阻尼的航空发动机高压转子拉杆结构装配检测方法[J]. 航空学报, 2012, 33(3): 470-478.

ZHANG Ziyang, XIE Shousheng, PENG Jingbo, et al. Assembly variation detection for rod fastening rotor of high pressure spool in aero-engine based on damping identification[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 470-478.

通讯作者: 周烁, 博士、研究员, 中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司装配中心主任工程师, 从事航空发动机整机装配技术及自动化装备研发, E-mail: zhoushuo1975@163.com。

Research Current Status and Prospect on Aero-Engine Assembly Process Technology

ZHANG Yu, LI Lin, CHEN Jin, SHI Xinyu, ZHOU Shuo

(AECC Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Company, Shanghai 200241, China)

[ABSTRACT] In the background of that: the new round science and technology revolution and global industry upgrading is expeditiously advancing, the innovation-driven development is erected as state strategy by China and traditional equipment manufacturing industry is under transformation and update, how to realize the transform of the aero-engine assembly from the traditional manufacturing mode characterized by labor-intensified and experience-dominated to the advanced manufacturing mode characterized by digitization, automation and intelligence, increase the assembly accuracy, consistency, reliability and efficiency at upper level, create more and larger value of final manufacturing in the product life cycle, it is not only an important strategic development issue for aero-engine industry, but also a commitment for the 'pearl on industry crown' to lead as a model for assembly manufacturing upgradation of other high-tech equipment product. Based on the aero-engine assembly process technology development condition, this paper presents the main gap between China and other country, analyzes the issues wherein, refines the research requirement of fundamental technology and engineering application technology, makes the prospect and suggestion for later assembly technology development. Hopefully, this paper provides the enlightenment and reference for aero-engine assembly process optimization and upgradation, related R & D project planning and establishment.

Keywords: Aero-engine; Intelligent assembly; Measurement technology; Modelling and simulation; Automation; Fundamental research

(责编 逸飞)