

引文格式: 高越, 刘萌, 孙惠斌. 数字孪生驱动的转子装配精度动态预测与优化[J]. 航空制造技术, 2026, 69(3): 25020031.

GAO Yue, LIU Meng, SUN Huibin. Digital twin-driven dynamic prediction and optimization of rotor assembly accuracy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(3): 25020031.

数字孪生驱动的转子装配精度动态预测与优化

高越¹, 刘萌^{1,2}, 孙惠斌¹

(1. 西北工业大学航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 西安 710072;

2. 中国航发南方工业有限公司, 株洲 412002)

[摘要] 以航空发动机转子为研究对象, 对其装配过程的误差传递和精度预测方法进行研究, 提出了数字孪生驱动的转子装配精度动态预测与优化方法。该方法将转子装配过程分为实体、虚拟两个空间, 以及零件、组件两个层级, 建立了装配偏差表征模型和装配精度动态预测与优化模型, 融合了虚实孪生数据的动态预测与优化技术, 可实现对转子任意装配节点的动态监测及后置装配节点的工艺优化。试验结果表明, 该方法对转子形心偏心的预测偏差 <6%, 平均偏差为 3.61%; 偏心角度预测偏差 <5°, 平均偏差为 2.94°。采用该方法优化装配后的转子同轴度相较传统方法提升约 16%, 有效提高了航发转子的装配精度, 可为航发转子装配工艺优化调控提供理论支撑。

关键词: 数字孪生; 航发转子; 装配精度; 动态预测; 工艺优化

中图分类号: V263.2; TH16

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020031

Digital Twin-Driven Dynamic Prediction and Optimization of Rotor Assembly Accuracy

GAO Yue¹, LIU Meng^{1,2}, SUN Huibin¹

(1. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China)

[ABSTRACT] A study was conducted on the error transmission and accuracy prediction methods during the assembly process of aero-engine rotors, and a digital twin-driven method for dynamic prediction and optimization of rotor assembly accuracy was proposed. This method divides the rotor assembly process into two spaces, physical and virtual, as well as two levels of parts and components. It establishes an assembly deviation characterization model and an assembly accuracy dynamic prediction and optimization model, with the core being the dynamic prediction and optimization technology that integrates virtual and real twin data. It can dynamically monitor any assembly node of the rotor and optimize the process parameters of post-assembly nodes. The experimental results show that this method has a prediction deviation of less than 6% for rotor centroid eccentricity, with an average deviation of 3.61%, and a prediction deviation of less than 5° for eccentricity angle, with an average deviation of 2.94°. The coaxiality of the rotor after optimized assembly using this method is improved by about 16% compared to traditional methods, effectively improving the assembly accuracy of aero-engine rotors and providing theoretical support for the optimization and control of aero-engine rotor assembly processes.

Keywords: Digital twin; Aero-engine rotor; Assembly accuracy; Dynamic prediction; Process optimization

收稿日期: 2025-01-21; 退修日期: 2025-02-18; 录用日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(52475540)

通信作者: 孙惠斌, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为智能制造、航空发动机装配。

航空发动机转子通常由多级轮盘组成,轮盘之间采用止口-螺栓连接^[1],装配过程为典型的串联装配,即按照指定方向依次装配各级轮盘^[2]。然而,在装配过程中,由于存在许多扰动因素,实物状态可能逐渐偏离理想状态,初始工艺优化参数不再是最优结果,装配精度难以达到预期的最佳水平,装配过程中的预测和调控能力有待加强。随着对转子装配精度要求的不断提高,迫切需要更加精密、动态和数字化的装配精度预测与优化技术^[3]。

对于转子堆叠优化技术,国内外已有较多研究。Whitney等^[4]提出了基于齐次坐标变换的误差传递模型,并通过试验验证预测模型的准确性。Ding等^[5]提出了一种表征多级零件装配过程的状态空间传递模型,并通过偏差仿真分析验证了模型的准确性。Yang等^[6]使用概率密度的方法预测转子组件的装配偏心率,并通过仿真的方式验证了模型的有效性。Mujeebuddin等^[7]基于传递矩阵,建立了发动机逐级装配的误差传递模型。Wang等^[8]通过对转子装配过程位置和方向公差传递的分析,提出了一种使用连接装配模型的堆栈构建装配方法。Ding等^[9-11]建立了一种考虑旋转关节的Jacobian-Torsor模型,进一步推导了基于Jacobian-Torsor模型的多级转子的装配偏差传递模型。涂建波等^[12]提出了一种基于几何代数的转子组件同轴度模型,显著提升了同轴度预测的效率。Zhang等^[13]以图像的形式将转子的跳动数据输入到机器学习模型中,进而建立了基于机器学习的转子组件同心度预测模型。常规的堆叠优化模型属于静态模型,在预测精度和优化调控上具有一定局限性。

由于数字孪生模型智能程度和灵活性较高,具有动态预测与迭代优化等优势^[14-15],其在航空发动机装配领域的应用日渐广泛。孙惠斌等^[16]提出了一种实现物理装配过程与虚拟模型交互共融的方法,提高了装配过程的智能性、主动性和预测性,为航空发动机装配技术水平的提升提供了切实可行的解决方案。曹增义等^[17]提出了面向航空发动机研制过程的数字孪生技术应用架构,为提升航空发动机研制水平提供了数字赋能。陈燕等^[18]综述了数字孪生技术在制造业中的关键技术和典型应用,为智能制造和工业数字化转型提供了理论支持和技术参考。张膺之等^[19-20]提出了一种考虑不确定性的数字孪生驱动的转静子装配间隙动态预测与调控方法,实现了转静子装配间隙的在线预测和装配工艺的动态优化。吴法勇等^[21]提出了一种转子不平衡分布的数字孪生模型,为实现高性能的航空发动机转子装配和不平衡分布控制提供了模型基础和参数优化策略。李瑾岳等^[22]提出了一种基于数字孪生的航空发动机配合界面装配分析方法,为提高航空发动机装配精度提供了新

的理论基础和技术支持。梅英杰等^[23]提出了一种基于增强现实的航空发动机机匣数字孪生测调系统,有效提高了航空发动机机匣装配的精度和效率。刘春等^[24]提出了一种基于数字孪生的大部件对接系统技术框架,通过数据采集、虚拟对接、可视化模型和虚实映射等技术,实现了对接过程的仿真、监控和数据驱动的可视化,提升了大部件装配的智能化水平。

传统的堆叠优化技术侧重实体空间的单次测量和虚拟空间的多次迭代,利用零件的实测数据作为输入,基于误差传递模型进行装配精度预测,通过优化迭代模型输出优化工艺参数。然而,上述静态模型忽视了装配过程中的状态变化,使预测模型难以同步、逼真地反映物理实际的动态变化,导致实物状态偏离预测值。因此,本文提出了数字孪生驱动的转子装配精度动态预测与优化方法,通过动态采集装配过程节点的真实数据,实现转子装配中间状态的动态监测,可有效提升装配过程中虚拟空间和实体空间的逼近程度,从而推动任意装配节点的工艺决策和优化调控,进一步提高转子组件的装配精度和优化效果。

1 转子堆叠数字孪生模型

为实现转子装配精度动态预测与优化,本文提出了转子堆叠动态预测与优化数字孪生模型,建模过程如图1所示。数字孪生模型将转子装配过程划分为实体空间和虚拟空间,以及零件层和组件层两个层级,通过将装配节点的测量数据作为动态输入,模型能够实时更新预测值并动态调整优化参数,其核心在于实体空间与虚拟空间之间的映射和动态交互。

数字孪生模型的关键在于实体空间的动态感知,以及虚拟空间的数字重建、动态预测和优化调控,旨在实现“以虚映实、以虚预实、以虚优实”的目标。实体空间涵盖所有零件、图纸、工艺手册等数据源,以及传感器、精密转台、测量机等数据测量设备,而虚拟空间则由孪生数据和数字孪生模型等构成。

零件层包括实体空间的数据采集和虚拟空间的数字重建。通过在实体空间中获取待装零件的装配特征数据,并在虚拟空间中同步建立数字孪生体,从而实现实体零件在虚拟空间的数字重建。

组件层包括两个部分:装配节点的特征动态采集和装配后的质量检验。前者通过装配节点测量,生成节点测量孪生体,并在虚拟空间中将虚实数据融合计算,实现装配精度的动态预测与优化;后者通过装配质量检验手段评价数字孪生模型的预测精度和优化效果,包括同轴度测量、组件跳动检查、不平衡量测量等方法。

通过这种分层、分空间的建模方式,数字孪生模型

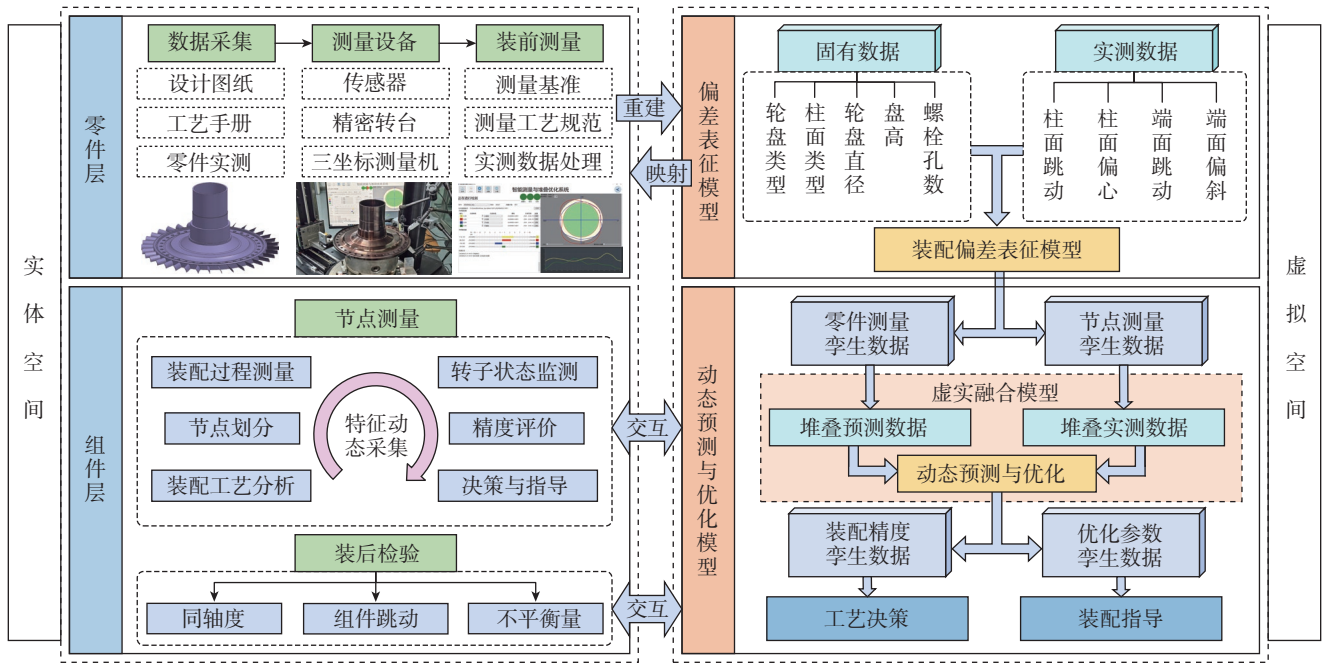


图1 转子堆叠动态预测与优化数字孪生模型

Fig.1 Digital twin model for dynamic prediction and optimization of rotor stacking

能够有效提升转子装配的精度和效率,实现从数据采集到预测优化的全流程动态管理。

1.1 装配数据采集

在数字孪生模型中,实体空间的装配数据采集至关重要,通过精确测量零件制造偏差,能够准确反映零件的实际状态,这些数据不仅为偏差建模提供了必要的依据,还为装配过程中的决策和优化提供了科学支持。

轮毂之间通常采用螺栓-止口连接,如图2所示,基于其结构特点,将零件数据分为固有数据和实测数据,前者是零件设计确定的基本参数,通常在零件设计图纸和工艺文件中给出;后者则源于零件加工过程带来的制造偏差,需要实际测量得到,是转子零件偏差建模的关键特征要素。

根据上述分析,通常一个转子零件至少有4个关键特征面,分别是两个特征柱面和两个特征端面,有效的测量措施包括圆柱度仪、三坐标测量机和精密转台测量等。圆柱度仪是采用回转轴法测量工件圆度误差的通用型设备;三坐标测量机具备转子测量能力,但其对回转件的测量效率较低;精密转台测量具有灵活性高、二次开发简便的优势,搭配四通道传感器可实现转子4个特征面的同步测量,便于将测量得到的原始数据快速导入数字孪生系统,实现转子零件的数字重建。

1.2 孪生数据分类

孪生数据是数字孪生系统中具有时变性的多维数据集。在该模型中,每个装配节点均包含多源孪生数据,如零件测量孪生数据(PDD)、节点测量孪生数据

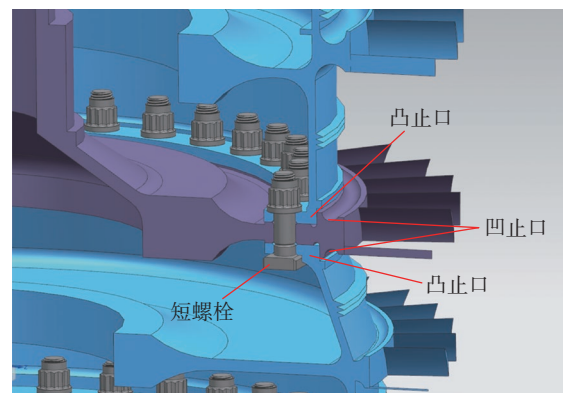


图2 转子止口连接结构

Fig.2 Rotor rabbet connection structure

(UDD)、装配精度孪生数据(ADD)、优化参数孪生数据(ODD)4类,孪生数据与装配节点的关系如图3所示。

(1)零件测量孪生数据涵盖所有实体零件的测量数据,以及在虚拟空间中进行数字重建所需的相关数据,包括零件数字化参数、跳动实测数据以及零件偏差表征模型等数据内容,主要用于实现零件的虚实“镜像”。

(2)节点测量孪生数据涵盖各装配节点装配体的测量数据,以及装配体偏差表征模型等数据内容,主要用于实现组件装配中间状态的监测。

(3)装配精度孪生数据是虚实融合模型的输出项,包括基于虚实融合数据的动态预测数据或基于实测数据的计算数据,可作为当前节点装配工艺决策的依据。

(4)优化参数孪生数据是虚实融合模型的输出项,

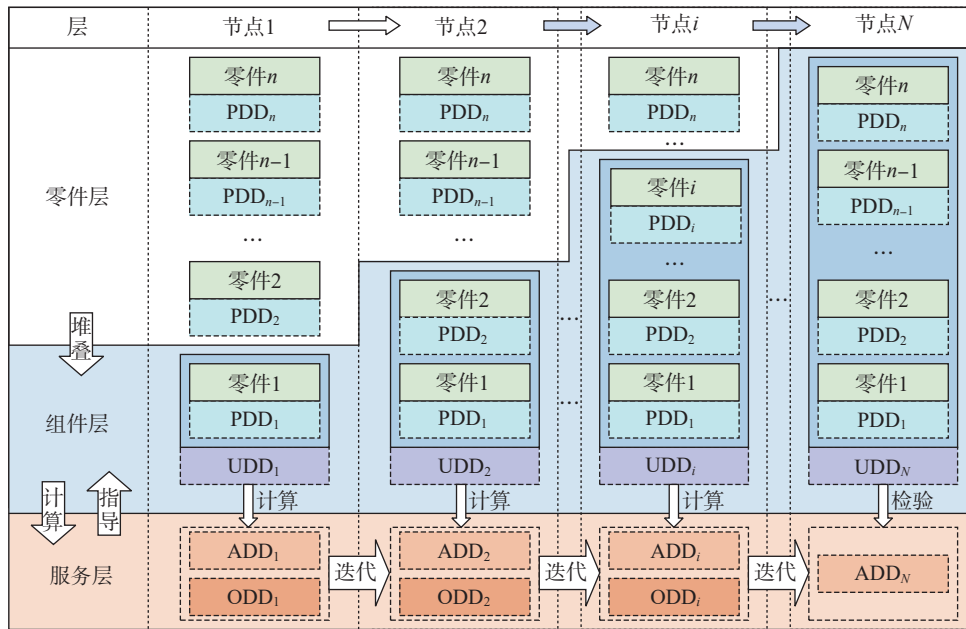


图3 数字孪生数据集

Fig.3 Digital twin dataset

主要内容为装配工艺参数的动态优化数据,作为后置节点装配工艺参数的指导依据。

1.3 模型运行原理

为建立基于多源孪生数据的转子装配精度动态预测与优化模型,需要依赖以下3项关键技术:转子装配偏差表征建模、多级轮盘堆叠建模,以及虚实融合的动态预测与优化建模。这些技术共同构成了模型的核心框架,分别从偏差表征、虚拟装配和动态优化3个层面支持装配精度的预测与优化。

(1) 转子装配偏差表征模型包括零件偏差表征和装配体偏差表征。前者用于表征零件自身的偏差,后者则用于表征零件在装配过程中的偏差,分别源自实体空间中的零件测量和装配节点测量。

(2) 多级轮盘堆叠模型通过在虚拟空间中对各级轮盘进行虚拟装配,实现对装配后各级轮盘空间姿态的预测。该模型以装配工艺参数和各级零件的偏差表征模型为输入,可以实现任意级别装配体的装配精度预测与优化。

(3) 虚实融合的动态预测与优化模型是基于偏差表征模型和多级轮盘堆叠模型建立的,通过融合零件孪生数据与装配体孪生数据的堆叠计算,在各装配节点获取最逼近真实状态的精度预测值和最优的装配工艺参数,从而实现融合虚实孪生数据的装配精度动态预测与优化。

2 动态预测与优化模型

2.1 偏差表征模型

零件测量时,直接测得的是跳动数据,经过去均值

化、偏差分类、数值匹配、数据拟合等步骤,可得到零件柱面拟合圆的圆心坐标 O_0 和 O_1 ,以及端面拟合平面的法向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{v} ,将两圆心连线 O_0O_1 用向量 \mathbf{u} 描述,便可利用矩阵 $[\mathbf{a}, \mathbf{u}, \mathbf{v}]$ 表征一个轮盘的几何偏差,如图4所示。

装配节点测量时,对象变为由若干个零件构成的装配体,由于已装配轮盘的相对状态不再发生变化,可将其看作一个整体,因此装配体偏差表征与零件一致,如图5所示。

2.2 多级轮盘堆叠模型

首先建立两级轮盘堆叠模型,由于转子为串联装配,每次装配都可看作两级轮盘的堆叠,因此可推导出多级轮盘的堆叠模型。两级轮盘堆叠时,第一级轮盘固定,可将第二级轮盘的空间位姿变化分解为两步,如图6所示。

第1步:第二级轮盘绕其下端法向量 \mathbf{a}_2 旋转相位角 θ_2 ,由于第二级轮盘下端法向量 \mathbf{a}_2 与Z轴同向,

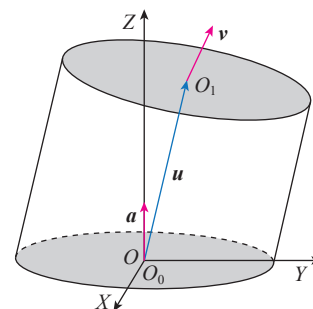


图4 转子零件几何偏差表征

Fig.4 Characterization of geometric deviation of rotor components

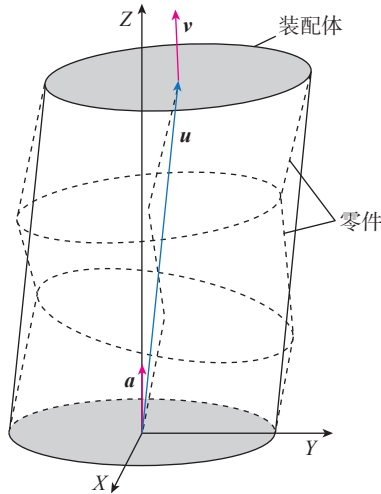


图5 转子装配体几何偏差表征

Fig.5 Characterization of geometric deviation of rotor assembly

可构建旋转矩阵 $R_Z(\theta_2)$ 为

$$R_Z(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

第2步: 将第二级轮盘装在第一级轮盘上,其下端面首先与第一级轮盘上端面高点接触,最后与低点接触。可以视作 a_2 旋转角度 α_k 至与 v_1 同向,旋转轴同时垂直于 a_2 和 v_1 。设 $v_1 = (v_x, v_y, v_z)^T$, 计算旋转轴单位向量 k_{std} 为

$$k_{std} = \frac{a_2 \times v_1}{\|a_2 \times v_1\|} = \frac{1}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} [-v_y, v_x, 0]^T \quad (2)$$

旋转角 α_k 为 a_2 和 v_1 的空间夹角,可通过式(3)计算。

$$\cos \alpha_k = \frac{a_2 \cdot v_1}{\|a_2\| \|v_1\|} = \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \quad (3)$$

根据罗德里格旋转公式,计算装配后的第二级轮盘

下端面法向量 $a_{asm,2}$ 为

$$a_{asm,2} = a_2 \cos \alpha_k + (1 - \cos \alpha_k)(a_2 \cdot k_{std})k_{std} + k_{std} \times a_2 \sin \alpha_k = [E \cos \alpha_k + (1 - \cos \alpha_k)k_{std} \otimes k_{std} + K_x \sin \alpha_k] a_2 \quad (4)$$

式中, E 为3阶单位矩阵; $k_{std} \otimes k_{std}$ 为张量积; K_x 为 k_{std} 的叉乘矩阵。

设 $a_{asm,2} = R(v_1) \cdot a_2$, 式(4)可以进一步改写成矩阵形式,即

$$R(v_1) = \begin{bmatrix} \frac{v_x^2 v_z + v_y^2 \|v_1\|}{(v_x^2 + v_y^2) \|v_1\|} & \frac{v_x v_y v_z - v_x v_y \|v_1\|}{(v_x^2 + v_y^2) \|v_1\|} & \frac{v_x}{\|v_1\|} \\ \frac{v_x v_y v_z - v_x v_y \|v_1\|}{(v_x^2 + v_y^2) \|v_1\|} & \frac{v_y^2 v_z + v_x^2 \|v_1\|}{(v_x^2 + v_y^2) \|v_1\|} & \frac{v_y}{\|v_1\|} \\ -\frac{v_x}{\|v_1\|} & -\frac{v_y}{\|v_1\|} & \frac{v_z}{\|v_1\|} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将上述两个步骤合并,即可获得第二级轮盘堆叠完成后新的空间位姿。

$$M_{asm,2} = R(v_1) R_Z(\theta_2) M_2 \quad (6)$$

式中, M_2 为第二级轮盘偏差表征模型的矩阵形式; $M_{asm,2}$ 为第二级轮盘堆叠后空间位姿的矩阵形式。

同理,第 n 级轮盘堆叠后的空间位姿 $M_{asm,n}$ 可表示为

$$M_{asm,n} = R(v_{asm,n-1}) R_Z(\theta_n) M_n \quad (7)$$

第 n 级轮盘上柱面形心向量 o_n 可通过矢量叠加计算,即

$$o_n = \sum_{i=1}^n u_{asm,i} \quad (8)$$

式中, $u_{asm,i}$ 为第 i 级轮盘柱面圆心连线向量。

计算第 j 个形心距离基准轴线的距离,即

$$d_j = \sqrt{\|o_j\|^2 - \left(\frac{o_j \cdot o_u}{\|o_u\|} \right)^2} \quad (9)$$

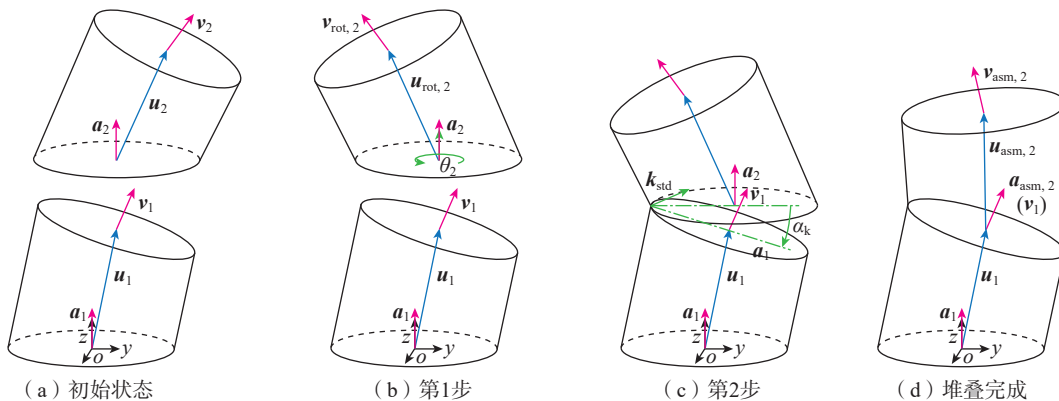


图6 两级轮盘堆叠模型

Fig.6 Stacking model of two-stage disks

式中, \mathbf{o}_j 为组件坐标系下第 j 个形心位置向量; \mathbf{o}_0 为组件基准轴线向量。

根据同轴度公差定义,各形心相对基准评价轴线的最大偏差所形成圆柱区域的直径即为同轴度,因此取各形心距离评价轴线的最大值的 2 倍作为同轴度大小。

$$E_0 = 2 \times \max \{d_j\}, j=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中, E_0 为同轴度大小。

2.3 虚实融合模型

虚实融合的动态预测与优化模型是在偏差表征模型和多级轮盘堆叠模型的基础上构建的。该模型通过零件测量孪生数据表征未装配零件的偏差,支持虚拟空间中的零件堆叠计算,同时利用节点测量孪生数据表征装配体偏差,反映装配体在实体空间中的真实偏差。通过将不同比例的虚拟装配数据和真实测量数据进行融合计算,便可在各装配节点获得基于当前节点最逼近真实状态的精度预测值和最优的装配工艺参数。模型运行逻辑如图 7 所示。

装配节点 i 及其前置节点的装配数据均有装配偏差的真实测量结果,用已装配部分的节点测量孪生数据 $UDD_1 \sim UDD_i$ 融合未装配部分的零件测量孪生数据 $PDD_{i+1} \sim PDD_n$,基于虚实融合模型进行装配精度的动态预测与优化,得到基于节点 i 最逼近真实状态的装配精度孪生数据 ADD_i 和最优的优化参数孪生数据 ODD_i ,从而为节点 i 的装配状态评价与决策提供依据,并对节点 i 之后的装配工艺参数提供新的指导。

随着装配节点的推移,虚拟空间逐渐向实体空间逼近,直到模型运行到最终节点时,模型的输入全部变成真实数据,模型输出的不再是预测值,而是转子装配精

度实测值。

根据上述逻辑,将 ODD 作为输入,将 ADD 作为输出,通过控制条件变量中 UDD 和 PDD 的比例实现虚实融合模型的运行控制,因此可将虚实融合的装配精度动态预测与优化模型的通用形式表示为

$$\min ADD_i = f(ODD_i | UDD_1, \dots, UDD_i, PDD_{i+1}, \dots, PDD_n) \quad (11)$$

针对具体目标的动态预测与优化可在该通用模型的基础上,选定优化目标,基于装配工艺设计约束条件和优化策略,并选用合适的优化算法实现。

以组件同轴度预测与优化为例,2.2 节已建立了组件同轴度预测模型,将各级轮盘安装相位作为优化工艺变量,由于其受到螺栓孔位置的限制,优化变量的取值将以相邻螺栓孔的相位差为间隔,该优化问题转变为离散优化问题,且变为一个具有有限解的优化问题。第 i 个装配节点的同轴度动态预测与优化函数如下。

$$\begin{cases} \min E_0 = f(x_1, x_2, \dots, x_n | UDD_1, \dots, UDD_i, PDD_{i+1}, \dots, PDD_n) \\ \text{s.t. } x_i = k \times (2\pi / Q_i) \\ i = 1, 2, \dots, n \\ k = 1, 2, \dots, Q_i \end{cases} \quad (12)$$

式中, n 为转子级数; x_i 为第 i 级轮盘装配相位; Q_i 表示第 i 级轮盘螺栓孔数量; k 表示第 i 级轮盘第 k 个螺栓孔与第一级轮盘零位处的螺栓孔对齐。

在同轴度动态预测与优化模型中,零件测量孪生数据 PDD 和节点测量孪生数据 UDD 作为优化函数的条件变量,同轴度归属于装配精度孪生数据 ADD,轮盘装配相位归属于优化参数孪生数据 ODD,随着装配节点的推移,同

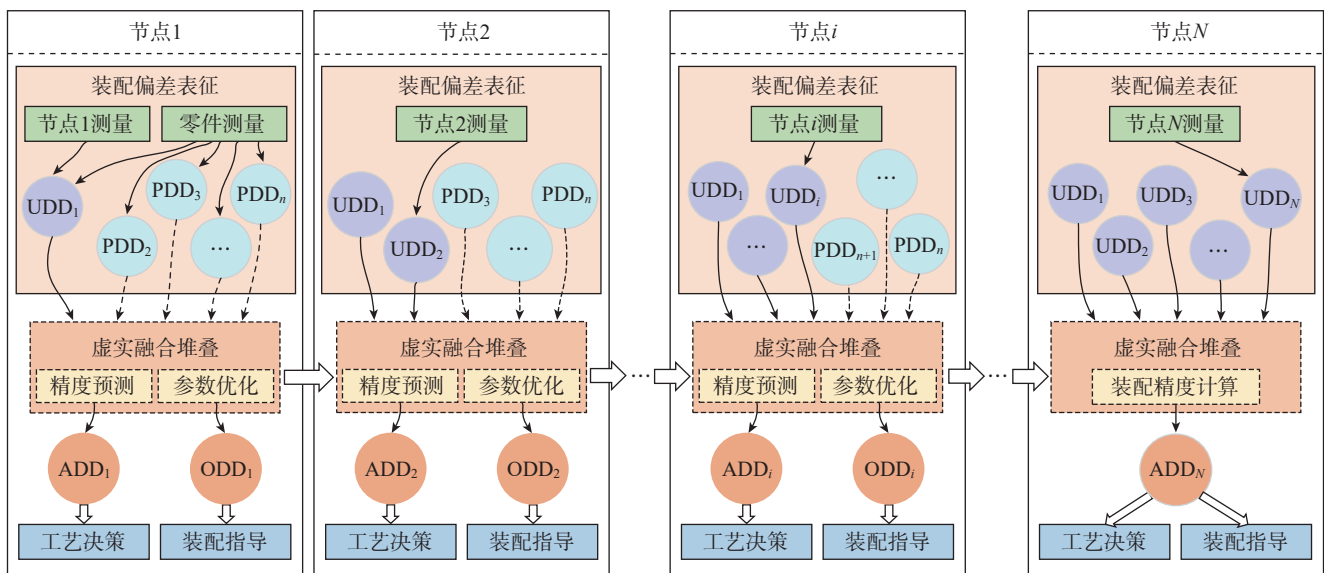


图 7 虚实融合模型运行逻辑

Fig.7 Operational logic of virtual-real fusion model

轴度预测值和装配相位优化结果可以实现动态更新。

3 试验验证

基于自主搭建的四通道快速测量系统构建数字孪生装配环境,验证所提数字孪生驱动的转子装配精度动态预测与优化方法。测量系统由多通道测量平台和智能测量和堆叠优化软件构成,测量平台由中精微公司的D400气浮转台、海克斯康公司的GT31位移传感器和BPX44四通道数据采集器、Chandox SC-09三爪卡盘、自制高精度调心调倾平台等组成,如图8所示。

试验对象为包含5级轮盘的转子模拟件,其结构如

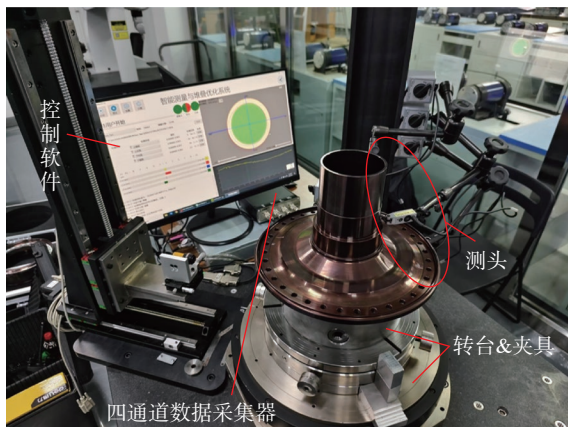


图8 四通道测量系统

Fig.8 Four-channel measurement system

图9所示,其中A、B为组件同轴度评价基准。

模拟件的装配顺序为5级盘到1级盘依次装配,最多可设置5个装配节点,如表1所示。

图10为试验流程。首先在装配节点1将5级轮盘依次进行测量,并输入数字孪生模型获得1~4级盘的初始优化相位,并按照相位装配4级和5级盘。进入节

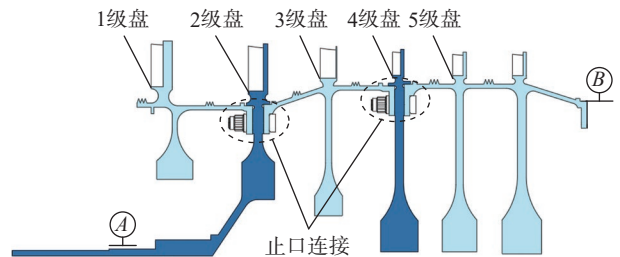


图9 模拟件结构

Fig.9 Simulation component structure

表1 装配节点映射表

Table 1 Mapping table of assembly nodes

| 装配节点 | 装配序列 | 测量对象 | 优化对象 |
|------|-------|---------|-----------|
| 1 | 5级盘 | 所有零件 | 1~4级盘安装相位 |
| 2 | 4~5级盘 | 4~5级装配体 | 1~3级盘安装相位 |
| 3 | 3~5级盘 | 3~5级装配体 | 1~2级盘安装相位 |
| 4 | 2~5级盘 | 2~5级装配体 | 1级盘安装相位 |
| 5 | 1~5级盘 | 1~5级装配体 | 无 |

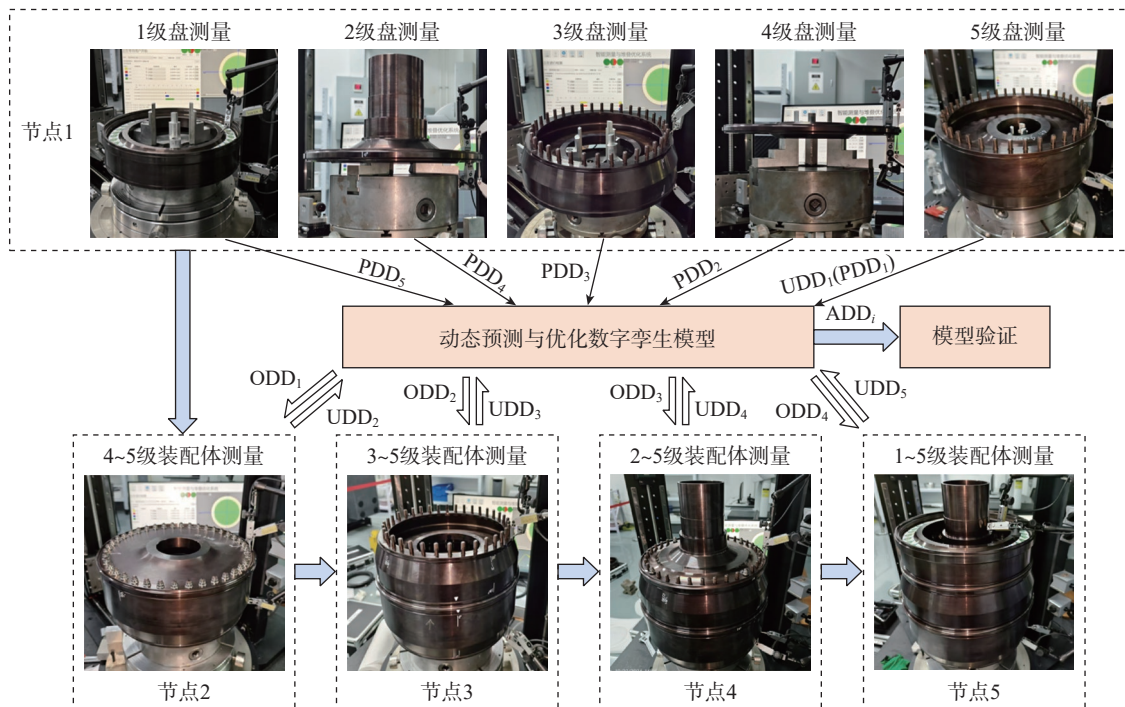


图10 试验流程

Fig.10 Test process

点2,对4~5级装配体进行测量,并将节点测量数据输入数字孪生模型,获得1~3级盘经调整后的优化相位。以此类推,最终将所有轮盘装配并测量,获得组件装配同轴度和形心偏差实测值。

按照上述试验流程,以组件同轴度作为优化目标,进行数字孪生驱动的动态预测与优化试验。试验结果如表2所示,各节点同轴度动态预测与优化过程如图11所示,模型预测与实测偏差如图12所示。

从上述试验结果可以得出两点结论。(1)随着装配节点的推移,最优装配相位会发生动态变化,两个相邻节点的预测结果最大偏差可达到45°,表明装配过程中需要根据实时数据动态调整相位参数。(2)数字孪生驱动的动态预测方法对形心偏心值的预测偏差小于6%(平均偏差为3.61%),偏心角度预测偏差小于5°(平均偏差为2.94°),且随着装配节点的推进,预测精度有明显的提升趋势,验证了该方法在动态预测与优化中的可靠性和实用性。

为验证采用数字孪生驱动的动态预测与优化方法相比传统堆叠优化方法的优势,以组件同轴度为优化目

标,采用传统堆叠优化方法进行了装配试验作为对照,对各节点装配体形心偏差进行了测量,计算形心距离评价轴线距离,两种方法的试验结果对比如图13所示。

从对比结果可以得出两点结论。(1)采用传统堆叠优化方法装配的转子同轴度为61.3 μm,采用数字孪生驱动的动态预测与优化方法装配的转子同轴度为51.4 μm,后者相较前者提升约16%,展现出显著优势。(2)在节点1,静态模型预测值与传统方法装配实测值更接近,平均偏差约2.44 μm,但随着装配节点的推移,动态模型预测值逐渐逼近数字孪生方法装配实测值,到节点4时,平均偏差降低到约0.13 μm,表明数字孪生驱动的动态预测与优化方法能够使虚拟空间随着装配过程的推进逐步逼近实体空间,实现更高精度的装配效果。

在实际装配中,通过合理设置装配节点,做好装配与测量的空间和时间规划,该模型可以轻松实现转子装配过程的动态监测与优化调控,并降低因装配过程中的扰动因素所导致的装配偏差,从而减少转子的装调次数,提升转子的整体装配质量和装配效率,为后置工序奠定良好的基础。

表2 装配体偏心试验数据

Table 2 Test datas of assembly eccentricity

| 装配节点 i | 模型优化相位 $ODD_i / (^\circ)$ | 模型精度预测 ADD_{i-1} | | | 装配体实测 UDD_i | | |
|----------|---------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| | | 形心偏心/ μm | 偏心角/ $(^\circ)$ | 同轴度/ μm | 形心偏心/ μm | 偏心角/ $(^\circ)$ | 同轴度/ μm |
| 1 | [140, 200, 117, 81] | N/A | N/A | N/A | 49.09 | 18.162 | N/A |
| 2 | [130, 200, 72] | 70.444 | 15.353 | 57.90 | 66.518 | 19.846 | N/A |
| 3 | [130, 200] | 88.727 | 6.955 | 57.83 | 93.775 | 3.364 | N/A |
| 4 | [100] | 117.473 | 24.014 | 57.76 | 117.715 | 22.881 | N/A |
| 5 | N/A | 144.409 | 8.268 | 52.73 | 148.789 | 10.824 | 51.46 |

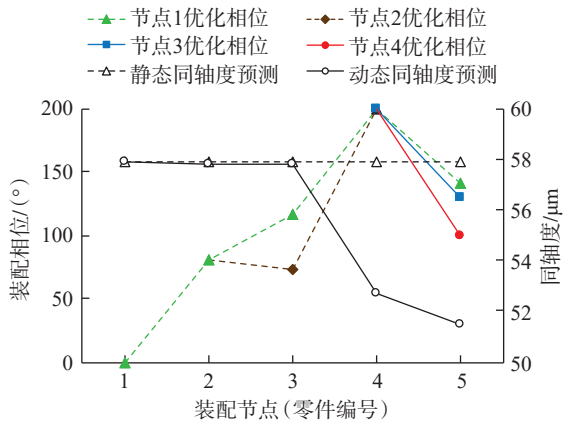


图11 动态预测与优化过程

Fig.11 Dynamic prediction and optimization process

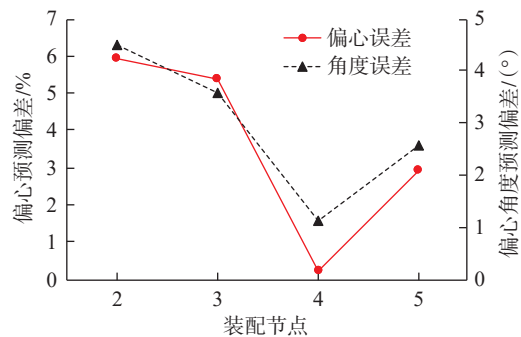


图12 模型预测偏差

Fig.12 Model prediction bias

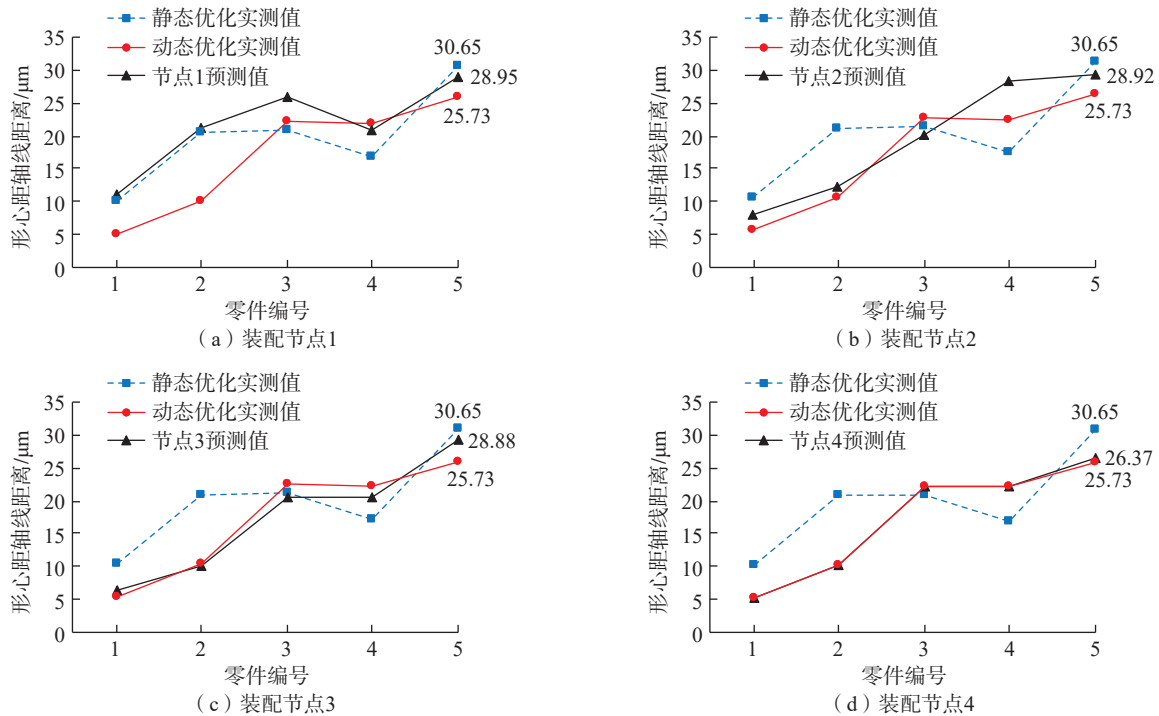


图 13 优化方法对比

Fig.13 Comparison of optimization methods

4 结论

本文提出了数字孪生驱动的转子装配精度动态预测与优化方法,并通过试验验证了该方法的预测精度与优化效果,得出主要结论如下。

(1) 基于装配偏差表征模型和多级轮盘堆叠预测模型,融合零件虚拟装配数据和装配节点真实测量数据,建立了虚实融合的装配精度动态预测与优化数字孪生模型,实现了转子装配中间状态的动态监测与工艺参数的动态优化。

(2) 以组件同轴度作为优化目标,进行了数字孪生驱动的转子装配动态预测与优化试验,试验结果显示,形心预测与实测偏差小于 6%,角度偏差小于 5°,同轴度优化结果相较传统堆叠优化方法提升约 16%,结果表明本文所提方法具有较高的预测精度,动态模型预测值更逼近实物状态,并具备更好的优化效果。

参考文献

- [1] 洪杰, 马艳红. 航空燃气涡轮发动机结构与[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
HONG Jie, MA Yanhong. Structure and design of aircraft gas turbine engine[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] 石宏. 航空发动机装配工艺技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
SHI Hong. Aeroengine assembly technology[M]. Beijing: Beijing

University of Aeronautics & Astronautics Press, 2015.

- [3] 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): 527484.

ZHAO Gang, LI Jinyue, XU Maocheng, et al. Research status and prospect of key aero-engine assembly technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 527484.

- [4] WHITNEY D E, GILBERT O L, JASTRZEBSKI M. Representation of geometric variations using matrix transforms for statistical tolerance analysis in assemblies[J]. Research in Engineering Design, 1994, 6(4): 191–210.

[5] DING Y, CEGLAREK D, SHI J. Modeling and diagnosis of multistage manufacturing processes: Part I state space model[C]. 2000 Japan/USA Symposium on Flexible Automation. 2000: 774–781.

- [6] YANG Z, MCWILLIAM S, POPOV A A, et al. A probabilistic approach to variation propagation control for straight build in mechanical assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(5): 1029–1047.

[7] MUJEEBUDDIN M, TANVEER H, ZEESHAN A M. Minimizing assembly errors by selecting optimum assembly sequence in the assembly of a rigid circular structure[J]. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology, 2012, 31(4): 743–754.

- [8] WANG L, SUN C Z, TAN J B, et al. Improvement of location and orientation tolerances propagation control in cylindrical components assembly using stack-build assembly technique[J]. Assembly Automation, 2015, 35(4): 358–366.

[9] DING S Y, JIN S, LI Z M, et al. Multistage rotational optimization using unified Jacobian-Torsor model in aero-engine assembly[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(1): 251–266.

- [10] DING S Y, ZHENG X H, BAO J S, et al. An improved Jacobian-Torsor model for statistical variation solution in aero-engine rotors assembly[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(3): 466–483.
- [11] 丁司懿, 周文波, 毛新华. 基于改进雅克比-旋量模型的航空发动机转子-叶片结构装配精度分析[J]. 航空制造技术, 2023, 66(8): 65–77.
- DING Siyi, ZHOU Wenbo, MAO Xinhua. Assembly precision analysis for rotor-blade structure of aero-engine based on improved Jacobian-Torsor model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(8): 65–77.
- [12] 涂建波, 李震, 葛浩田, 等. 基于几何代数理论的转子堆叠装配多目标优化[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524197.
- TU Jianbo, LI Zhen, GE Haotian, et al. Multi-objective optimization of rotor-stack assembly based on geometric algebra theory[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524197.
- [13] ZHANG Z H, GUO J K, SUN Y H, et al. Eccentricity of rotor prediction of aero-engine rotor based on image identification and machine learning[C]//ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2020
- [14] LENG J W, WANG D W, SHEN W M, et al. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 60: 119–137.
- [15] LATTANZI L, RAFFAELI R, PERUZZINI M, et al. Digital twin for smart manufacturing: A review of concepts towards a practical industrial implementation[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2021, 34(6): 567–597.
- [16] 孙惠斌, 颜建兴, 魏小红, 等. 数字孪生驱动的航空发动机装配技术[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 833–841.
- SUN Huibin, YAN Jianxing, WEI Xiaohong, et al. Digital twin-driven aero-engine assembly technology[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 833–841.
- [17] 曹增义, 单继东, 王昭阳, 等. 面向航空发动机制造的数字孪生应用架构探索与实践[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 40–49.
- CAO Zengyi, SHAN Jidong, WANG Zhaoyang, et al. Exploration and practice of digital twin architecture for aero-engine manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 40–49.
- [18] 陈燕, 王禹封, 谯木, 等. 数字孪生在制造业中实现的关键技术及典型应用综述[J]. 航空制造技术, 2024, 67(11): 24–45.
- CHEN Yan, WANG Yufeng, QIAO Mu, et al. Review on key technologies and typical applications of digital twin in manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(11): 24–45.
- [19] 张膺之, 孙惠斌, 周平, 等. 数字孪生驱动的转静子装配间隙动态预测与调控[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(6): 2035–2046.
- ZHANG Yingzhi, SUN Huibin, ZHOU Ping, et al. Digital twin-driven dynamic prediction and control method for assembly clearance of multi-stage rotor and stator[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(6): 2035–2046.
- [20] 张膺之, 孙惠斌, 颜诚, 等. 考虑区间不确定性的转子叶尖间隙预测数字孪生模型[J]. 航空学报, 2024, 45(21): 128–141.
- ZHANG Yingzhi, SUN Huibin, YAN Cheng, et al. A digital twin model for rotor tip clearance prediction considering interval uncertainty[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(21): 128–141.
- [21] 吴法勇, 王维斌, 陈雪骑, 等. 数字孪生驱动的转子装配及不平衡分布[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2023: 1–15. (2023–11–13). <https://link.cnki.net/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0659>.
- WU Fayong, WANG Weibin, CHEN Xueqi, et al. Rotor assembly and unbalance distribution driven by digital twins[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023: 1–15. (2023–11–13). <https://link.cnki.net/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0659>.
- [22] 李瑾岳, 张鹏飞, 郭跃成, 等. 基于数字孪生的航空发动机配合界面装配分析[J]. 航空学报, 2024, 45(21): 142–158.
- LI Jinyue, ZHANG Pengfei, GUO Yuecheng, et al. Assembly analysis of aero-engine mating interface based on digital twin[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(21): 142–158.
- [23] 梅英杰, 王大伟, 孙传智, 等. 基于增强现实的航空发动机机匣数字孪生测调系统[J]. 航空学报, 2024, 45(21): 86–98.
- MEI Yingjie, WANG Dawei, SUN Chuazhi, et al. A digital twin testing and adjusting system for aero-engine casings based on augmented reality[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(21): 86–98.
- [24] 刘春, 陈宇, 杨冬, 等. 飞机大部件对接系统数字孪生技术应用研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(1/2): 130–136.
- LIU Chun, CHEN Yu, YANG Dong, et al. Research on application of digital twinning technology in aircraft large parts docking system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(1/2): 130–136.

(责编 七七)