

DOI: 10.3901/JME.2023.21.270

数字孪生驱动的旋转叶盘振动状态全景感知方法^{*}

李宏坤 魏代同 陈玉刚 许书本
(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 针对旋转叶盘在线振动监测方法仅能获取有限测点信息的局限性,提出了一种基于数字孪生概念的旋转叶盘全域振动状态虚拟感知技术架构。首先,应用数字孪生理论从物理空间和数字空间分别介绍了该技术体系中各个模块的功能和逻辑关系,阐述了实现旋转叶盘振动状态全景感知的技术路线。其次,详细描述了孪生模型构建、非接触振动测试、孪生模型动态更新、虚拟感知及可视化模块开发等关键技术和实现方法。最后,面向旋转叶盘试验件构建了全域振动状态虚拟感知原型系统,对各项关键技术进行了理论分析与验证,并最终实现了动位移场和动应变场的全域状态感知。该方法能够在现有测试手段的基础上获得更加全面的叶盘振动信息,为旋转叶盘的在线状态监测提供了一种新的理论架构,并为后续进行叶盘疲劳寿命分析及可靠性预测提供有效的数据支撑。

关键词: 旋转叶盘; 数字孪生; 虚拟感知; 动响应场; 三维可视化

中图分类号: TH17; TP391

A Full-field Sensing Method for Vibration State of Rotating Bladed Disks Driven by Digital Twin

LI Hongkun WEI Daitong CHEN Yugang XU Shuben
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Aiming at the limitation that the on-line monitoring method of rotating bladed disk can only obtain limited measuring point information, a virtual sensing technology framework of the global vibration state of rotating bladed disk based on the digital twin is proposed. Firstly, the functions and logical relationships of each module in the technical system are introduced from the physical space and digital space by using the digital twin theory, and the technical route to realize the full-field sensing of the rotating bladed disk is described. Secondly, the key technologies and implementation methods of twin model construction, non-contact vibration test, update of twin model, virtual sensing and visual module development are described in detail. Finally, a global vibration state virtual sensing system of rotating bladed disk is constructed, and the key technologies are theoretically analyzed and verified, and the global state sensing of the dynamic response field is realized. This method can obtain more comprehensive vibration information of bladed disk on the basis of existing testing methods, which provides a new theoretical framework for on-line monitoring of rotating bladed disks, and provides effective data support for fatigue analysis and reliability prediction of bladed disks.

Key words: rotating bladed disk; digital twin; virtual sensing; dynamic response field; three-dimensional visualization

0 前言

叶盘广泛应用于航空发动机、压缩机等大型旋

转机械中,对旋转机械的安全运行起到关键性作用,其工作环境通常比较恶劣,极易产生裂纹、断裂等故障^[1]。为了实时掌握叶片振动状态,叶片振动在线测量技术已被广泛重视和研究^[2-6]。但目前在线监测面临传感器安装困难、监测数据少等问题,传统的应变测试存在可靠性低、数据传输难、应变片安装困难等问题。现如今,叶尖定时传感测试技术是

^{*} 国家重点研发计划(2020YFB2010800)和国家自然科学基金(92060105)资助项目。20221212 收到初稿,20230620 收到修改稿

对叶盘进行状态监测的重要手段。叶尖定时测试虽然具有非接触、安装方便、能够监测所有叶片振动等优点,但也存在只能监测叶尖位置处的周向位移,采样频率低等缺点,无法实时对整个叶盘的振动特性进行全面的监测。上述问题的存在严重制约了叶盘结构的疲劳分析和寿命预测。因此,寻求一种叶盘振动状态在线、全面监测方法具有重要意义。

最近,被广泛关注的数字孪生(Digital twin, DT)技术,有望为运行状态下叶盘状态的全面感知提供有效的解决途径。数字孪生是一种集成多物理场、多尺度、多学科属性,具有实时同步、忠实映射、高保真度特性,能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段^[7]。数字孪生的概念最早在美国密歇根大学 GRIEVES 教授所讲授的产品全生命周期管理课程上被首次引入^[8]。在工程领域,使用数字孪生技术进行设计、优化、过程控制、虚拟测试、预测性维护和寿命预测的好处被提出。数字孪生具有以下优点^[9]: ①可以实现设备状态的全方位感知; ②通过早期故障预警实现预测性维护; ③能够实现实时高效的风险评估和决策。数字孪生不仅能够为决策提供实时全方位数据信息,还能够预测设备未来的发展和行为。数字孪生一般包含三个部分: 物理对象对应的数字化模型、与对象相关的一组不断变化的数据以及根据数据动态更新模型的方法^[10]。

近几年众多学者在不同领域探索了数字孪生技术的应用潜力。TAO 等^[11]针对复杂装备提出了一种通用的数字孪生框架,用于设备的状态预测与健康管管理。在旋转机械方面,WANG 等^[12]提出了基于参数敏感性分析的转子系统孪生模型更新方案,并对考虑不平衡故障的转子系统进行了更新方法验证。BOTZ 等^[13]针对风力涡轮机创建了数字孪生模型,通过收集风力机支撑结构的数据并结合仿真模型,对不同运行场景下风力机结构的最高应力位置进行了监测,估计了部件的疲劳使用寿命。JOHANSEN^[14]介绍了采用数字孪生模型对船舶动力传动系统进行状态监测的方法,提出了采用多体仿真建立传动系统数字孪生模型的方法。ZHOU 等^[15]和 ZHANG 等^[16]分别提出了数字孪生驱动的离心叶轮和航空发动机叶片制造应用框架。HU 等^[17]提出了基于叶尖定时测试的整体叶盘失谐参数辨识方法,并将其用于修正有限元参数来实现数字孪生模型的实时更新,初步提出了整体叶盘监测的数字孪生框架。GUIVARCH 等^[18]采用多体动力学形式建立了直升

机动力系统的多个子系统的局部模型,用以形成数字孪生系统。

综上所述,数字孪生已经在结构健康监测领域有了一定的发展。但在旋转叶盘状态监测领域还缺乏深入的研究与探讨。因此,本文针对旋转叶盘振动状态在线监测问题,提出了一种基于数字孪生驱动的全域虚拟感知技术架构,并分别从孪生建模、模型更新、非接触式振动测试、虚拟感知、可视化模块开发等关键技术进行了细致介绍与应用分析。该技术架构的应用可以有效地实现旋转叶盘振动状态的在线虚拟感知,实时呈现叶盘运行过程中的动位移场和动应变场,为叶盘的在线振动状态监测提供一种全景可视化手段。同时,也可对叶盘的疲劳寿命预测及可靠性评估提供有效的数据支撑。

1 DT 驱动的叶盘虚拟感知技术架构

数字孪生在工业界和学术界存在不同的定义和理解。现在较为普遍认可的数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性,具有实时同步、忠实映射、高保真度特性,能够实现物理空间与数字空间实时交互与融合的技术手段^[19]。其功能在于能够在物理实体与数字化模型之间建立全面的准实时关系。从本质上来讲,数字孪生并不是一种新兴技术,而是伴随着大数据技术、人工智能技术、物联网技术、云计算等技术的蓬勃发展,在动态数据驱动的仿真(Dynamic data-driven simulation, DDDS)技术的基础上进一步发展的概念^[20]。

数字孪生是具有普适性的理论技术体系,可以在众多领域应用。针对旋转叶盘状态监测面临的在线测试难、感知信息少等问题,本文基于数字孪生概念提出了一种面向旋转叶盘振动状态全景感知的技术架构,如图 1 所示。其特点在于,通过数据-机理融合驱动的方法实现了旋转叶盘状态的在线虚拟感知,特别是能够消除非定常气动载荷不清对振动状态评估的限制。

根据数字孪生的基本概念,该技术架构主要包含物理空间和数字空间。物理空间主要包括针对旋转叶盘的振动测试技术和数据通信技术。旋转叶盘的振动测试可采用接触式的应变测试或者非接触式的叶尖定时(Blade tip timing, BTT)测试。其中,叶尖定时测试是具有较大应用前景的在线振动测试技术。针对 BTT 测试技术已经开展了较多的研究,主要涉及定时数据预处理和振动参数识别算法两方

面。数据通信模块可采用 RS232、RS485、以太网等方式实现测试数据及控制指令在数字空间和物理空间之间的信息交互。



图 1 基于 DT 的旋转叶盘状态全景感知架构

数字空间主要包括孪生模型构建模块、模型在线动态更新模块、全域状态虚拟感知模块以及人机交互可视化模块。孪生模型构建模块是整个技术架构中的核心部分，是数字空间的主体。通过多种模型构建技术实现物理旋转叶盘的数字化，并结合模型轻量化技术和模型降阶技术实现数字孪生模型的实时或近实时运行特性。模型在线动态更新模块主要功能是在叶盘运行阶段对孪生模型进行动态更新，以满足数字孪生模型对物理实体的忠实映射特性。状态虚拟感知模块结合有限的试验测试数据与孪生模型的机理数据，采用卡尔曼滤波或其改进方法、系统等效模态缩减/扩展过程(System equivalent reduction/expansion process, SEREP)等实现旋转叶盘全域振动状态的虚拟感知。人机交互与数据可视化模块主要功能是将虚拟感知数据映射到旋转叶盘的几何模型上，将振动参数以动态数据表的形式体现在可视化界面上，并可通过数据传输接口实现控制指令的发送。通过数据的动态交互，不仅能够收集物理对象状态数据也能实现在数字空间对物理对象进行实时调控，以达到物理对象的最佳运行状态。

2 关键技术

依据上述体系架构，本节提取并详细阐述支撑

体系架构执行的五项核心技术的相关理论和实现方式。核心技术主要包括：孪生模型构建技术、非接触式振动测试技术、孪生模型动态更新技术、虚拟感知技术和可视化模块开发技术。

2.1 旋转叶盘孪生模型构建

数字孪生模型是一个能够镜像或模拟物理系统或单个组件及其周围环境的数字模型。根据陶飞^[21]团队提出的五维模型中虚拟实体所包含的概念，在旋转叶盘状态监测场景下，本文所描述的叶盘虚拟模型(Virtual model, VM)主要包括几何模型(G_v)、性能模型(P_v)以及行为模型(B_v)，如图 2 所示。即，虚拟模型可以通过以上子模型进行刻画与表征

$$VM=(G_v, P_v, B_v)$$

式中， G_v 主要描述物理叶盘所对应的几何形状、尺寸位置、装配关系等空间几何特征，实现在几何属性方面对物理叶盘的虚拟映射。 P_v 主要描述物理实体在外界载荷下所呈现出的结构强度、动力学特性等基本物理属性。 B_v 主要描述由于外界环境干扰或退化所引起的材料或几何参数随时间尺度变化的特性。

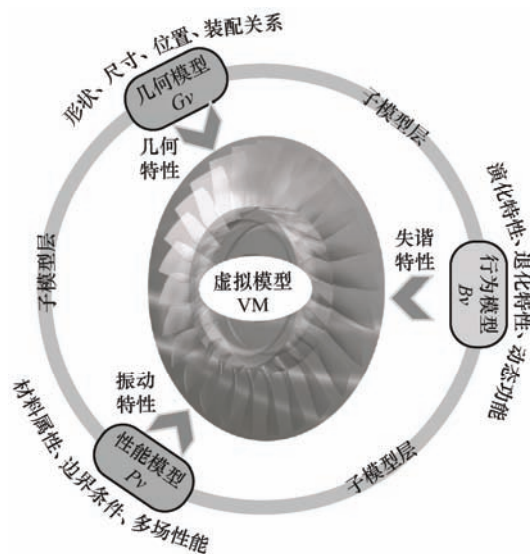


图 2 数字孪生叶盘模型基本组成

对于 G_v ，可采用三维建模软件进行构建，在构建过程中根据所关注的空间尺度对物理几何进行细节特征简化和轻量化处理。通过几何简化，过滤不需要的细节特征，以降低 P_v 构建过程的难度及计算成本。同时，采用顶点及三角形面对三维几何信息进行进一步定义，以优化 GPU 渲染效率，实现 G_v 的轻量化部署。

对于 P_v ，可根据有限元理论对 G_v 进行离散，并定义基本材料属性及边界条件。旋转叶盘频域动力学方程可以表示为

$$\left[\mathbf{K}^0 + \Delta \mathbf{K}_{\text{rotate}} + i\omega(\mathbf{C} + \mathbf{G}) - \omega^2 \mathbf{M}^0 \right] \mathbf{u} = \mathbf{F}_{\text{load}} \quad (1)$$

式中, \mathbf{M}^0 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K}^0 分别为谐调叶盘的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{G} 为科氏矩阵; $\Delta \mathbf{K}_{\text{rotate}}$ 为因旋转引起的刚度矩阵变化量; \mathbf{u} 为叶盘位移响应向量; \mathbf{F}_{load} 为外部环境载荷。

通常, P_v 具有较高的自由度, 这使得动力学特性评估产生较高的计算成本, 无法直接应用于孪生模型的在线部署及应用。因此, 采用文献[22]中提出的基于频域本征正交分解(Proper orthogonal decomposition, POD)的模型降阶方法进行 P_v 的降阶, 以实现孪生模型所应具备的近实时运行特性。

POD 的本质是基于动力学系统的快照数据, 寻找一组正交基底 $\hat{\Phi} = (\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_n)$, 使得原系统向正交基投影后误差最小。假设 \mathbf{U} 是一组预先求解的快照数据, 其中 $\mathbf{u}^i(\omega)$ 表示激励频率为 ω 时的响应数据, 则系统响应在该正交基底上的投影应满足

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^t \left\| \mathbf{u}^i(\omega) - \sum_{j=1}^n (\mathbf{u}^i(\omega), \hat{\phi}_j) \hat{\phi}_j \right\|^2 \rightarrow \min \\ \hat{\Phi}^T \hat{\Phi} = \mathbf{I} \end{array} \right. \quad (2)$$

式(2)中有约束最小值问题等价于原系统响应在正交基上的投影最大, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} G = \sum_{i=\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{(\mathbf{u}^i, \hat{\Phi})^2}{\|\hat{\Phi}\|^2} \rightarrow \max \\ \hat{\Phi}^T \hat{\Phi} = \mathbf{I} \end{array} \right. \quad (3)$$

为解决式(3)中有约束条件下的最大化问题, 引入拉格朗日乘子 λ_i , 则上述问题可以重新表述为

$$\hat{\phi}_i^T \mathbf{U}^T \mathbf{U} \hat{\phi}_i - \lambda_i (1 - \hat{\phi}_i^T \hat{\phi}_i) \rightarrow \max \quad (4)$$

式(4)对应的最优化问题, 等价于求相关矩阵 $\mathbf{R} = \mathbf{U}^T \mathbf{U}$ 特征值问题。计算相关矩阵的特征值和特征向量, 并按特征值从大到小排列, 得到矩阵的一组特征值和特征向量。其中, 则第 j 个 POD 基向量是快照数据 $\mathbf{u}^i(\omega)$ 的线性组合, 如下式所示

$$\phi_i = \mathbf{U} \hat{\phi}_i \lambda_i^{-1/2} \quad (5)$$

将 ϕ_i 按照对应的 λ_i 进行降序排列, 可以得到 POD 基向量或称本征正交模态(Proper orthogonal mode, POM)为

$$\Phi = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m) \quad (6)$$

式中, m 为 POM 的数量。POM 存在一个显著的特点, 即其特征值 λ_i 呈快速下降的趋势, 前几个 POM 即可表征系统的大部分特性。一般情况下, 前几个特征值的总和通常能占到所有特征值总和的 90% 以上, 可取代表性的前几阶 POM 而保留原矩阵绝大部分的信息, 设置阈值 e_1

$$\sum_{j=1}^k \lambda_j / \sum_{j=1}^m \lambda_j \geq e_1 \quad (7)$$

式中, k 为截取的 POM 数量, $k \ll m$ 。基于上述过程截取的 POM 并结合伽辽金投影方法, 将 P_v 投影到本征正交空间, 即可进行叶盘动力学特性的快速评估。

由于旋转叶盘需要承受高温、高压、重载等恶劣工作条件, 同时在遭受异物侵入、碰摩等故障时, 叶盘结构在几何特性、材料属性及气动性能等方面都会发生改变。因此, 本文引入 B_v 来考虑由于外界环境、内部运行机制所引起的材料性质、几何形状等参数的演变。例如, 可以描述失谐特性、阻尼特性、几何参数等随时间尺度的变化。

2.2 非接触式振动测试与参数辨识

数字孪生系统应能够对物理对象的多源异构数据进行采集与分析, 实现基本的状态感知。目前, 针对旋转叶片的振动监测技术研究始于 20 世纪 30 年, 由美国西屋公司率先开始, 其发展也逐渐由接触式过渡到非接触式测量方法。接触式测量方法主要是应变片法^[23-24], 通过在叶片应力集中处粘贴应变片, 利用测量叶片应变的方法来衡量叶片的振动情况。自 20 世纪 60 年代, 人们开始将研究重点转向非接触的测量方法。国内外研究学者对旋转叶片振动的非接触式在线测量方法进行了大量研究, 主要包括频率调制法^[25-26]、间断相位法^[27]、微波测量法^[28]、声响应法^[23, 29]、间接测量法^[30-31]、BTT^[32-33]等。其中, BTT 技术的提出与发展对高速旋转叶片的运行状态监测具有重大意义, 是一种非常高效的叶片振动监测方法。

BTT 测量技术的基本原理如图 3 所示, 通过安装在机匣上的 BTT 探针来测量旋转叶片的到达时间, 计算实际到达时间 t_{act} 与理论到达时间 t_{exp} 的差值, 并结合相应的振动参数识别算法得到旋转叶片端部的振动位移。相比于接触测量方法而言, 其优点是能够对同级的所有叶片进行监测。但由于每转一圈探针只能采集一次叶片的到达时间, 导致 BTT 采样信号为严重的欠采样信号, 必须运用特殊算法对其进行处理才能辨识得到叶片的振动参数。

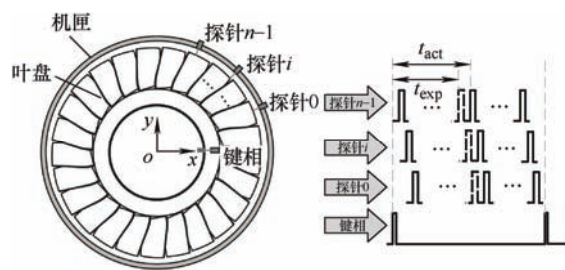


图3 叶尖定时测试原理

本文拟采用周向傅里叶拟合(Circumferential Fourier fitting, CFF)算法^[33]进行振动参数的识别,其原理是将叶片的振动视为多阶模态振动的叠加。即,任意时刻叶片的振动位移可以表示成多个谐波叠加的形式

$$y = \sum_{i=1}^h A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + C \quad (8)$$

式中,谐波数 $h \geq 1$; A_i 为第 i 个谐波的振动幅值; φ_i 表示为第 i 个谐波的初始相位; C 表示为叶片振动的恒定偏移量。

叶片在恒速下发生同步振动时,叶片的振动频率是叶盘转频的整数倍,即 $\omega = N_e \times \Omega$, Ω 为叶盘转频,单位为 rad/s , N_e 为倍频值。在机匣上任意安装 n 个探针,各个探针的相对夹角分别为 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}$ (其中 $\theta_0 = 0^\circ$)。考虑单频占优的同步振动成分,对于单个叶片不同的叶尖探针分别采样到不同的恒定位移值

$$y_j = A \sin(N_e \theta_j + \varphi) + C, \quad (j = 0, \dots, n-1) \quad (9)$$

式(9)经过三角函数变换,可以改写为

$$y_j = A \cos \varphi \sin(N_e \theta_j) + A \sin \varphi \cos(N_e \theta_j) + C \quad (10)$$

将其写成矩阵形式可以表示为

$$Y = BX \quad (11)$$

式中

$$X = [A \sin \varphi \quad A \cos \varphi \quad C]^T \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \cos(N_e \theta_1) & \sin(N_e \theta_1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(N_e \theta_{n-1}) & \sin(N_e \theta_{n-1}) & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Y = [y_0 \quad \dots \quad y_{n-1}]^T \quad (14)$$

结合倍频遍历法^[34]和最小二乘法可以求出

$$X = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (15)$$

从而可以进一步得出叶片振动频率、振动幅值、

振动相位及振动恒偏量等参数。

2.3 孪生模型更新

孪生模型应能够根据外部测试数据进行在线动态更新,以实现物理对象的忠实映射。本小节以失谐特性描述的 B_v 为例,介绍基于叶尖定时测试数据和 POD 降阶方法的孪生模型动态更新技术。

在不考虑旋转效应的基础上,考虑失谐特性描述的 B_v , 则式(1)可以改写为

$$[K^0 + \Delta K + i\omega C - \omega^2(M^0 + \Delta M)]u = F_{\text{load}} \quad (16)$$

式中, ΔM 和 ΔK 分别表示失谐所导致的质量矩阵和刚度矩阵的改变量。基于 POD 模型缩减理论,响应振幅可以表示为一系列本征正交模态 POM 的叠加形式,即

$$u = \Phi \mu \quad (17)$$

式中, μ 为相应 POM 的系数。

将上式代入式(16)并左乘 Φ^T 可以得到降阶后的 P_v 为

$$(\Lambda^0 + \Delta \hat{K} + i\omega \Phi^T C \Phi - \omega^2(\Lambda^0 + \Delta \hat{M}))\mu = \hat{F} \quad (18)$$

式中, Λ^0 和 Λ^0 分别为谐调叶盘的本征模态质量矩阵和本征模态刚度矩阵, 而且有

$$\Delta \hat{K} = \Phi^T \Delta K \Phi \quad (19)$$

$$\Delta \hat{M} = \Phi^T \Delta M \Phi \quad (20)$$

$$\hat{F} = \Phi^T F \quad (21)$$

采用瑞利阻尼假设, 则有

$$C = \alpha(M^0 + \Delta M) + \beta(K^0 + \Delta K) \quad (22)$$

式中, α 为质量矩阵系数; β 为刚度矩阵系数。则可以得到

$$\begin{aligned} & [(1 + i\omega\beta)\Delta \hat{K} + (i\omega\alpha - \omega^2)\Delta \hat{M}]\mu = \\ & \hat{F} - [\Lambda^0 + i\omega(\alpha I + \beta \Lambda^0) - \omega^2 \Lambda^0]\mu \end{aligned} \quad (23)$$

对叶盘 N 个扇区各叶片的弹性模量 E_j 和密度 ρ_j 同时引入不同的无量纲扰动系数 p_j 和 q_j 来模拟失谐, 并将 p_j 和 q_j 作为失谐和识别参数。从而可以有

$$E_j = E_0(1 + p_j) \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (24)$$

$$\rho_j = \rho_0(1 + q_j) \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (25)$$

在忽略轮盘失谐的情况下, 存在

$$\Delta \hat{K} = \sum_{j=1}^N \Phi^T \Delta K^{b(j)} \Phi = \sum_{j=1}^N p_j \Delta \hat{K}^{b(j)} \quad (26)$$

同样对于质量矩阵的变化, 可以由式(20)得

$$\Delta \hat{\mathbf{M}} = \sum_{j=1}^N \Phi^T \Delta \mathbf{M}^{b(j)} \Phi = \sum_{j=1}^N q_j \Delta \hat{\mathbf{M}}^{b(j)} \quad (27)$$

由于式(23)中包含有激振力项, 而对于运转过程中叶盘所受的非定常气动载荷很难实测得到。为了消除激振力项, 分别取激振力频率为 ω_j 、 ω_k 。假设 ω_j 、 ω_k 非常接近时, 激振力除了频率不同外, 其他要素(如幅值和分布位置)均相同, 那么在相同的 POM 基向量下, 将 ω_j 、 ω_k 分别代入式(23)并相减得到

$$\begin{aligned} & \left[(1 + i\omega_j \beta) \Delta \hat{\mathbf{K}} + (i\omega_j \alpha - \omega_j^2) \Delta \hat{\mathbf{M}} \right] \mu_j - \\ & \left[(1 + i\omega_k \beta) \Delta \hat{\mathbf{K}} + (i\omega_k \alpha - \omega_k^2) \Delta \hat{\mathbf{M}} \right] \mu_k = \\ & \left[\mathbf{A}^0 + i\omega_k (\alpha \mathbf{I} + \beta \mathbf{A}^0) - \omega_k^2 \mathbf{I}^0 \right] \mu_k - \\ & \left[\mathbf{A}^0 + i\omega_j (\alpha \mathbf{I} + \beta \mathbf{A}^0) - \omega_j^2 \mathbf{I}^0 \right] \mu_j \end{aligned} \quad (28)$$

根据失谐识别参数 p_j 和 q_j ($j=1, 2, \dots, N$) 的个数, 需要利用多个实测的响应数据作为输入参数进行识别, 将式(28)整理为矩阵形式可以得到失谐识别基本方程为

$$\mathbf{L} \mathbf{P} = \mathbf{R} \quad (29)$$

失谐参数向量 \mathbf{P} 为待求量, 其余均为已知量, 利用最小二乘原理可得到失谐参数向量 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = \mathbf{L}^+ \mathbf{R} \quad (30)$$

由式(30)可知, 失谐参数数量较多, 导致方程规模增加, 同时也导致对输入参数的需求量增大。为了降低模型规模, 可以仅采用弹性模量(或者密度)来模拟失谐, 以提高辨识效率。孪生模型的更新流程如图 4 所示。

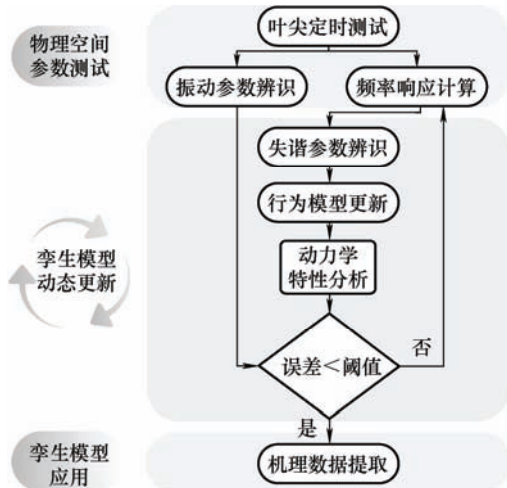


图 4 孪生模型动态更新流程

由第 2.2 节可知, 采用叶尖定时测试技术并结合 CFF 方法可以获得叶尖测点的频率响应。因此, 可以选取共振区内各个叶尖的频率响应作为输入信息, 结合本小节介绍的基于 POD 降阶模型的失谐参数识别方法进行扇区的失谐参数辨识, 从而实现孪生模型的动态更新。

2.4 孪生数据驱动振动状态虚拟感知

目前, 叶尖定时法是进行叶片振动参数测量的最有效手段。但其缺点是仅通过监测叶尖的振动来分析叶片的振动情况, 难以全面感知叶盘的振动特性。因此, 本文提出了基于叶尖定时测试数据和系统等效缩减/扩展过程的旋转叶盘响应场全景感知方法, 其实施流程如图 5 所示。

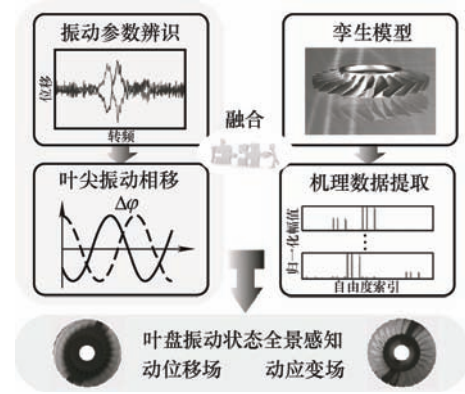


图 5 旋转叶盘响应场全景感知实施流程

由于结构对激励的响应可以表示为多个 POM 的线性组合。全部自由度可以划分为测试自由度(下标 a 表示)和未测试自由度(下标 d 表示)。则式(17)可以改写为

$$\begin{Bmatrix} u_a \\ u_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_d \end{Bmatrix} \mu \quad (31)$$

式中, Φ_a 为结构测试自由度的 POM 振型子集; Φ_d 为结构未测试自由度的 POM 振型子集。式(31)可以表示为测试自由度方程

$$u_a = \Phi_a \mu \quad (32)$$

则有

$$\mu = (\Phi_a^T \Phi_a)^{-1} \Phi_a^T u_a = \Phi_a^g u_a \quad (33)$$

式中, 上标 g 表示矩阵的广义逆矩阵。为了获得全自由度的响应, 将式(33)中获得的 μ 代入式(17)中有

$$u = \Phi_n \Phi_a^g u_a \quad (34)$$

类似的, 对于叶盘的应变响应也可以表示为 POM 应变振型的线性组合

$$\varepsilon = \mathbf{V} \mu \quad (35)$$

式中, V 为 POM 应变模态矩阵; ε 为结构的应变响应。

式(35)结合式(33)即可求出叶尖位移至应变场的转换关系为

$$\varepsilon = V\Phi_a^s u_a \quad (36)$$

其关键在于测点自由度数目要大于等于截取的 POM 振型数目。

此外, 对于系统等效缩减/扩展方法, 需要的测试数据为同一时刻的测试值。由于叶尖定时测试的特点, 一个探针虽然能够获得所有叶尖的周向振动位移, 但是并不是同一时刻采集的结果。因此, 需要对某个探针采集到的不同叶片的周向振动位移进行相移。考虑叶盘所受载荷为行波激励形式时, 影响相位的主要因素主要有两方面。

(1) 由激励载荷引起的每个叶片上的相位差

$$\varphi_{f,k} = (k-1) \times \frac{2\pi ND}{N} \quad (k=1,2,\dots,N) \quad (37)$$

式中, ND 为节径。

(2) 由于叶片周向分布角度引起的相位差

$$\varphi_{b,k} = (k-1) \times \frac{2\pi N_e}{N} \quad (k=1,2,\dots,N) \quad (38)$$

则, 最终获得对应的同一时刻的叶片响应为

$$y_k = A_k \sin(\omega t + \varphi + \varphi_{f,k} + \varphi_{f,b}) + C \quad (39)$$

式中, $k=1,2,\dots,N$ 。

2.5 孪生数据可视化模块开发

传统的数据显示模块通常采用波形图、数值列表、柱状图等显示方式, 上述方法虽然可以快速显示重要的单值或单测点数据, 但是无法快速全面掌握结构的整体状态。而三维云图则可以直观地反映待测结构物理场的分布情况。因此, 本小节提出了一种面向旋转叶盘的振动状态三维可视化模块开发方法, 如图 6 所示。主要包括三维轻量化模型载入、传感器位置定义、测试数据接入、数据三维映射及场景多视角辅助查看等模块。

首先, 通过导入轻量化的叶盘模型创建三维场景对象, 并开发相应的场景对象辅助观察功能, 例如旋转、缩放、平移、透视、剖分、隐藏显示等功能。其次, 在模型点云的基础上定义传感器测点的位置。可通过两种方式进行创建, 一是通过鼠标点击实现测点的拾取, 二是通过定义传感器坐标的形式, 实现测点位置的精确定义。

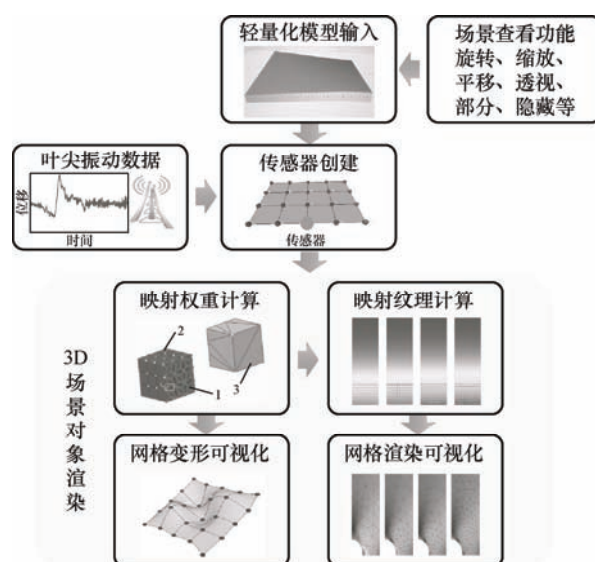


图 6 可视化模块开发流程

三维数据映射功能是可视化模块的核心部分, 通过定义位移映射矩阵和应变映射矩阵结合实际测试获得的叶尖振动数据计算模型中不同节点位置处的位移和应变值, 映射矩阵可根据式(34)及式(36)计算获得, 映射矩阵中的值本质是不同节点位置处相对于传感器测点位置的权重系数。为了实现三维云图的渲染, 通过映射矩阵及 RGB 颜色系统计算纹理数组, 从而最终实现三维模型在动态数据驱动下的模型变形运行可视化以及模型的动态渲染。

3 案例分析与验证

本文作者团队基于提出的架构体系, 研发了一套面向旋转叶盘振动状态的全景虚拟感知原型系统。以学术叶盘为案例, 其结构如图 7 所示, 说明各关键技术的应用方式。叶盘的材料及几何参数如表 1 所示。

表 1 叶盘基本参数

参数	数值
弹性模量/GPa	2.01
密度/(kg/m ³)	7.85
泊松比	0.30
扇区数	9.00
叶盘半径/mm	140.00
叶片厚度/mm	2.00
叶片展弦比	2.65
叶片安装角/(°)	45



图7 旋转叶盘结构图

3.1 模型轻量化与降阶模型构建

本小节采用 ANSYS 软件中 Solid45 单元构建旋转叶盘的有限元模型，如图 8 所示。整体叶盘的有限元模型共计有 17 280 个单元和 22 860 个节点，因此，总共有 68 580 个自由度。式(1)中表示的动力学方程的维度为 $68\,580 \times 68\,580$ 。考虑到整体叶盘的实际安装，对整体叶盘内圆柱面施加固定约束。

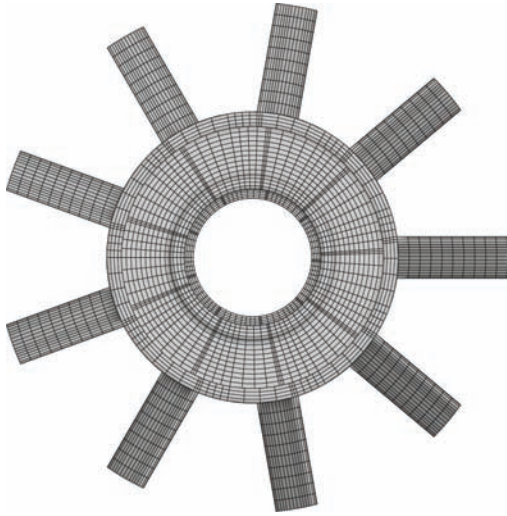


图8 有限元模型

由于有限元模型具有较高的自由度，在进行动力学方程求解时会导致较高的计算成本。因此，采用第 2.1 小节所述的模型降阶方法，以满足孪生模型的近实时特性。在第一模态族频率范围内分别获取不同节径下的谐响应数据作为快照数据集，并进行 POD 分解，根据 POM 模态能量占比进行降阶基的截取，如图 9 所示。由图 9 可知，共需截取前 9 个 POM 模态才能较好地表征叶盘的动力学特性，即 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_9]$ 。

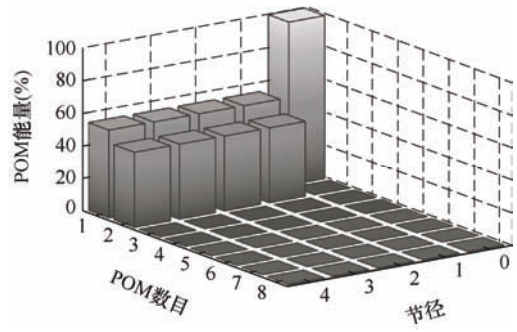


图9 POM 截取

为了验证降阶模型的有效性，采用失谐特性描述的行为模型，假设某一运行阶段各个叶片存在随机失谐，定义式(24)中的 p_j 如表 2 所示，其标准差为 4%。

表2 刚度失谐量

扇区	失谐量
1	-0.019 54
2	0.020 46
3	-0.057 12
4	-0.031 24
5	-0.058 44
6	0.019 63
7	0.065 09
8	-0.029 68
9	0.021 82

基于孪生模型求解在上述失谐状态下的叶盘固有特性，分别获得如表 3 所示的固有频率对比结果和如图 10 所示的模态置信因子。固有频率结果和模态置信因子结果均表明，孪生模型在动力学特性方面与全阶有限元模型具有较好的近似。

表3 固有频率对比

阶次	全阶模型/Hz	孪生模型/Hz
1	441.50	441.54
2	441.98	442.01
3	447.75	447.78
4	448.00	448.02
5	450.27	450.27
6	458.71	458.72
7	458.93	458.94
8	459.48	459.49
9	468.50	468.54

同时，由于几何模型的渲染会占用较多的 GPU 资源，为了提高三维模型渲染过程的流畅度，针对叶盘的几何模型进行轻量化处理，采用三角形面和

顶点的形式对模型进行预处理,获得如图 11 所示的轻量化模型,共计获得三角形面 5 400 个,顶点数 16 200 个,其中包含在三角形面交接位置处的重合顶点。

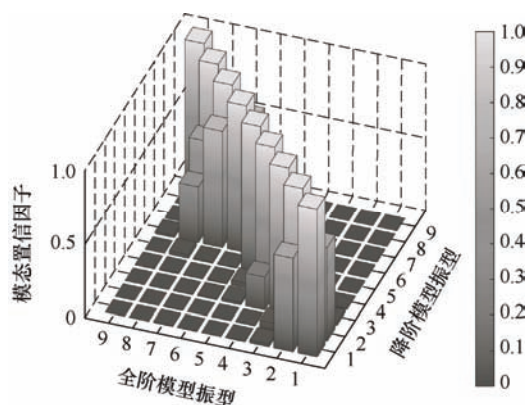


图 10 模态置信因子

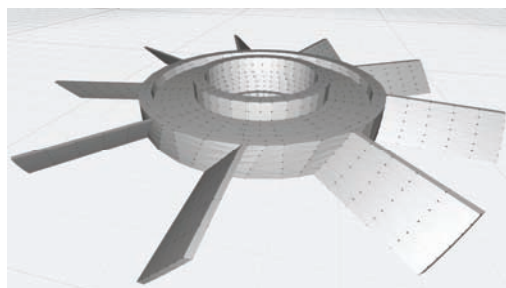


图 11 几何轻量化模型

3.2 非接触测试与振动参数识别

如图 12 所示为旋转叶盘振动试验现场图。在叶盘周向分别布置 5 个叶尖定时探针(TIP1、TIP2、TIP3、TIP4、TIP5)，探针相对于第一个探针(TIP1)的角度分别为 0° 、 36° 、 54° 、 72° 、 108° 。在旋转轴附近安装 1 个键相探针作为时间基准，探针布局如图 13 所示。在叶盘的前端均匀布置 10 个气体喷嘴，通过压缩气体(空气压力为 0.7 MPa)对叶盘施加连续气体激励。

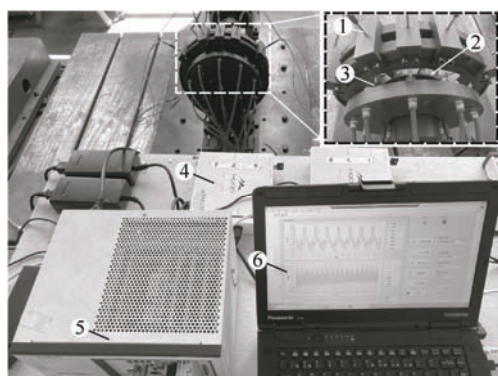


图 12 旋转叶盘振动试验现场图

1. BTT 探针 2. 叶盘 3. 空气喷嘴 4. 光电模块 5. 数据采集箱
6. 采集软件平台

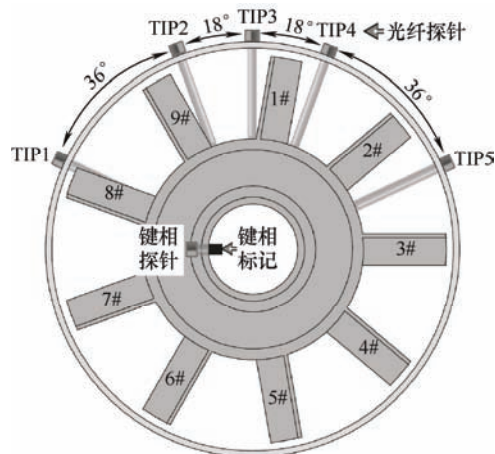


图 13 叶尖探针分布示意图

基于 LabVIEW 平台开发叶尖定时测试软件,主要包括定时数据采集、振动参数识别、响应场全景感知与数据传输模块。其中,定时数据采集模块主要功能是对叶盘旋转过程中叶片到达不同探针的时间进行采集,获得时间序列。振动参数识别与响应场全景感知模块主要功能是基于采集获得的时间序列进行预处理,并基于第 2.2 小节所述的振动参数识别算法进行振动参数识别,获得每个叶片的振动幅值、频率、阻尼等参数。其次,结合第 2.4 小节所述的动态响应场虚拟感知理论,进行全域响应场的评估。数据传输模块采用 WebSocket 通讯方式将叶盘振动参数上传至远程服务器,并进行保存用于构建运行状态历史数据库。基于先进算法可以对历史数据、当前数据进行深层次的分析,获取叶盘健康状态及性能的动态评估与预测。

基于开发的测试平台采集叶盘转频在频率区间 $[20\text{ Hz}, 50\text{ Hz}]$ 内的叶尖振动响应。如图 14 所示为不同探针获得的 3#叶片的叶尖振动位移。可以看出,在设定的转频范围内,激发出了不同阶次的叶片共振,其中以 N_e10 处的共振幅值最高。

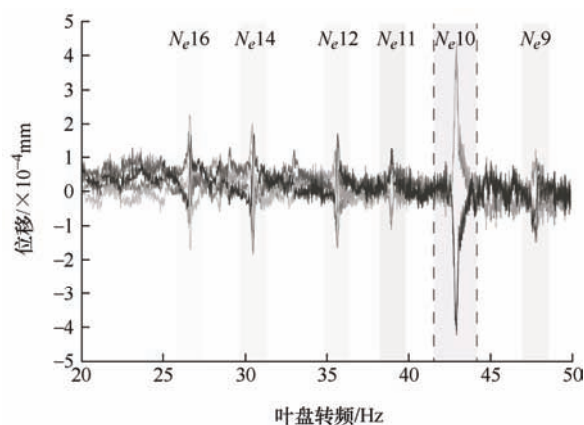


图 14 不同探针测得的振动位移

采用周向傅里叶拟合方法, 进行振动参数识别, 获得如图 15 所示的频率响应曲线。由图 15 可以看出, 受叶片不同失谐程度的影响, 每个叶片的共振频率不同, 在升速过程中每个叶片依次产生共振。

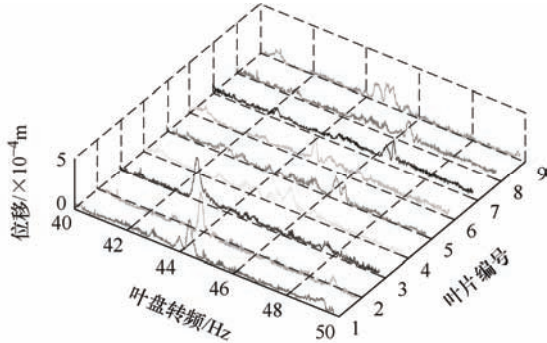


图 15 不同叶片频率响应

3.3 孪生模型在线更新

由于加工阶段的制造误差以及叶盘运行阶段摩擦磨损、高温蠕变等因素的影响, 叶盘的行为模型会随着服役时间的增加逐渐发生演化。因此, 需要对叶盘的行为模型进行在线更新, 以满足孪生模型对于物理实体的忠实映射特性。本小节以叶盘失谐特性描述的行为模型进行更新, 以验证相关理论的有效性。

将如图 15 所示的各个叶片的频率响应作为基本输入信息, 结合第 2.3 小节提出的模型更新方法对失谐参数进行辨识, 获得如表 4 所示的识别结果。

表 4 刚度失谐量辨识结果

扇区	失谐量
1#	-0.039 83
2#	-0.055 78
3#	-0.101 98
4#	-0.016 30
5#	0.011 39
6#	-0.031 70
7#	0.010 11
8#	0.022 41
9#	-0.039 04

基于识别结果进行孪生模型修正, 并计算获得叶盘的坎贝尔图, 如图 16 所示。可以看出, 在试验转频范围内仅在较少的几个叶片上激发了 $N_e 9$ 的阶次共振。并且不同阶次共振出现位置与图 13 中出现的位置基本一致。

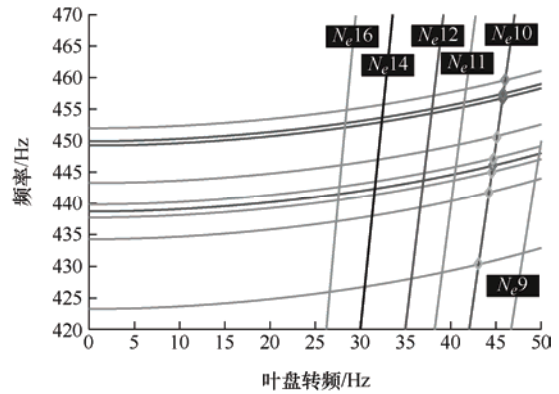


图 16 模型更新后坎贝尔图

提取坎贝尔图中阶次线 $N_e 10$ 与各个频率线交叉点处的频率值, 并与测试获得的每个叶片的固有频率进行对比。可以获得如表 5 所示的对比结果。结果表明, 孪生模型的计算误差绝对值不超过 2%。可以看出, 在进行模型更新后, 孪生模型的动力学特性与实际叶盘的动力学特性较为接近。

表 5 固有频率对比

阶次	试验测试/Hz	孪生模型/Hz	误差(%)
1	427.41	430.32	0.68
2	437.85	441.71	0.89
3	441.62	445.10	0.79
4	445.59	446.17	0.13
5	447.74	447.35	-0.09
6	458.72	450.51	-1.79
7	464.24	456.53	-1.66
8	466.28	457.56	-1.87
9	466.43	459.55	-1.48

3.4 虚拟感知与可视化模块开发

为了验证第 2.4 节描述的叶盘动应变场虚拟感知方法的有效性, 分别在 1#、4#、6#、9#叶片根部粘贴应变片进行应变测试, 如图 17 所示。

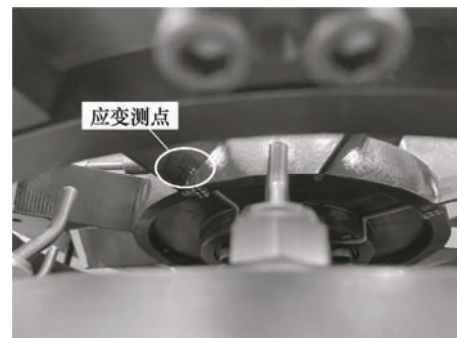


图 17 应变测点

在叶盘转频为 44.58 Hz 状态下, 获得如图 18 所示的 9#叶片的应变历程曲线, 并与孪生模型获得

的应变历程进行对比。由于应变测试噪声的影响,计算得到孪生模型结果与测试结果的应变均方根值分别为 9.48×10^{-5} 和 1.06×10^{-4} , 误差为 11.77%。结果表明,第 2.4 节描述的动响应场虚拟感知方法在实际应用阶段具有一定的可靠性。

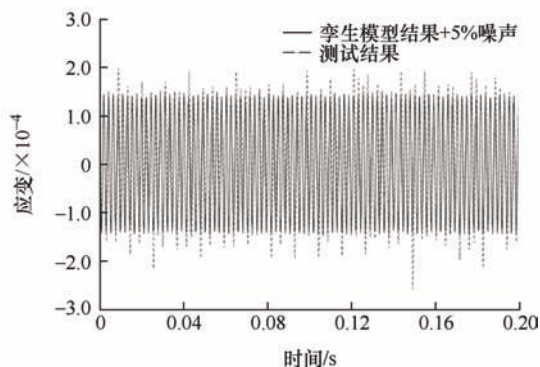


图 18 9#叶片应变历程对比

为了实现旋转叶盘全域动响应场的云图渲染与振动状态的直观展示,基于 LabVIEW 平台开发了三可视化模块,该模块主要包括测试数据与基础信息输入、场景创建及轻量化模型导入、模型变形及渲染数据计算、场景对象更新等功能构成。其中,场景创建及轻量化模型导入功能可以允许用户进行传感器位置的手动或自动定义。传感器测点的位置以叶尖区域的圆球表示,如图 19 传感器测点配置界面中所示。同时,对于模型变形和渲染云图的显示可通过传感器列表中选择按钮进行控制。

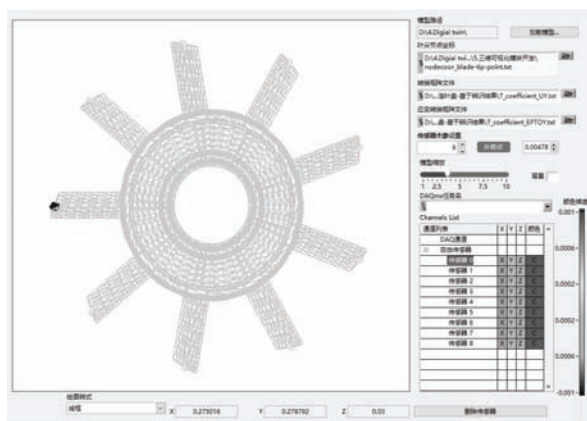


图 19 传感器测点配置界面

图 20 和图 21 分别为旋转叶盘某一时刻周向的动位移场和动应变场的可视化渲染云图界面。由图可知,叶尖区域的振动位移较大,叶片根部附近的应变较大。结果表明,该可视化模块能够较好的从全局角度对叶盘的振动状态进行显示,为旋转叶盘的状态监测提供了一种新的数据可视化途径。

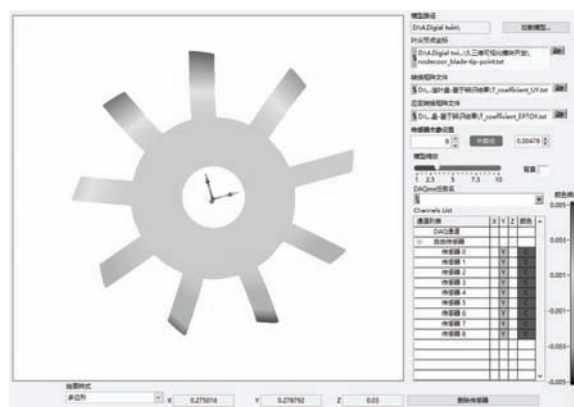


图 20 动位移场可视化渲染云图界面

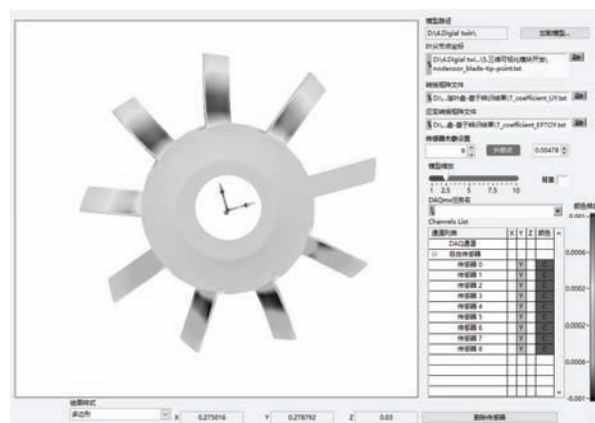


图 21 动应变场可视化渲染云图界面

4 结论

本文提出了一种基于数字孪生概念的旋转叶盘振动状态全景感知技术框架。对其涉及的关键技术(孪生模型构建、非接触式振动测试、孪生模型更新、虚拟感知、可视化模块开发)进行了详细的理论介绍。并将此框架应用于旋转叶盘试验件,构建了旋转叶盘振动状态监测的原型系统,针对各项关键技术进行了验证分析,结果如下。

(1) 结合试验测试和孪生模型分析结果,验证了本文提出的性能模型降阶方法和行为模型更新方法的有效性。在动力学特性方面,孪生模型能够较好的近似实际运行阶段的叶盘特性。

(2) 通过应变测试,验证了基于机理-数据融合的旋转叶盘振动状态虚拟感知方法。该方法有效增强了对旋转叶盘振动状态的全局认知,实现了动位移场和动应变场的全域状态感知。

(3) 基于 LabVIEW 平台开发的三维可视化模块可以实现叶盘实际振动状态的全景展示,为旋转叶盘的状态监测,提供了新的数据可视化途径。

参 考 文 献

- [1] DIAMOND D H, HEYNS P S, OBERHOLSTER A J. Improved blade tip timing measurements during transient conditions using a state space model[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 122: 555-579.
- [2] KARMALITA V. Yule series model application for blade tip timing readouts processing resulting in blade oscillation characteristics estimation[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 2018, 1(4): 041002.
- [3] BATTIATO G, FIRRONE C M, BERRUTI T M. Forced response of rotating bladed disks: Blade Tip-Timing measurements[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 85: 912-926.
- [4] LIU Meiru, TENG Guangrong, XIAO Xiao, et al. Vibration measurement of turbine rotor blades of aero-engine based on blade tip-timing[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(9): 1954-1963.
- [5] DIAMOND D H, STEPHAN H P. A novel method for the design of proximity sensor configuration for rotor blade tip timing[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2018, 140(6): 061003.
- [6] ZHANG Jilong, DUAN Fajie, NIU Guangyue, et al. A blade tip timing method based on a microwave sensor[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 1097.
- [7] TAO Fei, CHENG Jiangfeng, QI Qinglin, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(9): 3563-3576.
- [8] RAJRATNAKHARAT, BAVANE V, JADHAO S, et al. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[C]//*Proceedings of the NC-RACE 18 (Recent Advances in Science and Engineering)*. Shegaon, 2018, 96-125.
- [9] RASHEED A, SAN O, KVAMSDAL T. Digital Twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective[J]. *IEEE Access*, 2020, 8(1): 21980-22012.
- [10] WRIGHT L, DAVIDSON S. How to tell the difference between a model and a digital twin[J]. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 2020, 7(1): 1-13.
- [11] TAO Fei, ZHANG Meng, LIU Yushan, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(1): 169-72.
- [12] WANG Jinjiang, YE Lunkuan, GAO Robert X, et al. Digital twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 57: 3920-3934.
- [13] BOTZ M, EMIROGLU A, OSTERMINSKI K, et al. Monitoring and modeling of a wind turbine support structure to create a digital twin[J]. *Beton-und Stahlbetonbau*, 2020, 115(5): 342-354.
- [14] JOHANSEN S S, NEJAD A R. On digital twin condition monitoring approach for drive trains in marine applications[C]//*Proceedings of the ASME-the International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. United kingdom, 2019, 1-10.
- [15] ZHOU Yu, XING Tong, SONG Yue, et al. Digital twin driven geometric optimization of centrifugal impeller with free-form blades for five-axis flank milling[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, 58: 22-35.
- [16] ZHANG Xuqian, ZHU Wenhua. Application framework of digital twin-driven product smart manufacturing system: A case study of aeroengine blade manufacturing[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16(5): 1-16.
- [17] HU Dongfang, WANG Weimin, ZHANG Xulong, et al. On-line real-time mistuning identification and model calibration method for rotating blisks based on blade tip timing(BTT)[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 147: 107074.
- [18] GUIVARCH D, MERMOZ E, MARINO Y, et al. Creation of helicopter dynamic systems digital twin using multibody simulations[J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(1): 133-136.
- [19] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2018, 24(1): 1-18.
- [20] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(4): 1-10.
- ZHANG Lin. Cold thinking about digital twins and the modeling and simulation techniques behind them[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(4): 1-10.
- [21] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten application [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2019, 25(1): 1-18.

- [22] WEI Daitong, LI Hongkun, CHEN Yugang, et al. A novel model reduction technique for mistuned blisks based on proper orthogonal decomposition in frequency domain[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 121: 107320.
- [23] LEON R L, TRAINOR K. Monitoring systems for steam turbine blade faults[J]. Pollutants, 1990, 24: 12-15.
- [24] AL-BEDDOOR B O. Blade vibration measurement in turbo-machinery: Current status[J]. The Shock and Vibration Digest, 2002, 34(6): 455-461.
- [25] 张玉贵. 烟气轮机叶片振动的非接触式在线监测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- ZHANG Yugui. Key technology research on non-contact online monitoring for fume turbine blade vibration[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [26] 王宇华, 段发阶, 叶声华, 等. 涡轮机叶片振动的非接触测量[J]. 宇航计测技术, 2002, 22(2): 20-24.
- WANG Yuhua, DUAN Fajie, YE Shenghua, et al. Noncontact vibration measurement on turbines rotor blades[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2002, 22(2): 20-24.
- [27] 韩中合, 张万杰, 刘江. 基于单叶顶传感器非接触在线测量叶片振动间断相位法的研究[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(4): 56-59.
- HAN Zhonghe, ZHANG Wanjie, LIU Jiang. Study on discontinuous phase method of noncontact on-line monitoring turbine blade vibration based on single tip sensor[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(4): 56-59.
- [28] WAGNER M, SCHULZE A, VOSSIEK M, et al. Novel microwave vibration monitoring system for industrial power generating turbines[C]//Proceedings of the ARFTG Conference Digest-Spring. IEEE Xplore, 1998, 33: 143-146.
- [29] 杨海燕, 刘启洲. 叶片裂纹故障的多普勒在线监测技术仿真研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(1): 70-74.
- YANG Haiyan, LIU Qizhou. Simulation study on doppler on-line monitoring technology for blade crack fault[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(1): 70-74.
- [30] AL-BEDDOOR B O. Dynamic model of coupled shaft torsional and blade bending deformations in rotors[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 169(1): 177-90.
- [31] AL-BEDDOOR B O. Reduced-order nonlinear dynamic model of coupled shaft-torsional and blade-bending vibrations in rotors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2001, 123(1): 82-87.
- [32] SHEGELSKIMARK R A, STOKERJAMIE S, KELLETTIAN. Tipping time of a holonomic quantum cylinder[J]. Canadian Journal of Physics, 2011, 89(9): 903-913.
- [33] HEATH S. A new technique for identifying synchronous resonances using tip-timing[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(2): 219-225.
- [34] 欧阳涛, 段发阶, 李孟麟. 恒速下旋转叶片同步振动辨识方法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(8): 742-746.
- OUYANG Tao, DUAN Fajie, LI Menglin. Method for identifying rotating blade synchronous vibration at constant speed[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 742-746.

作者简介: 李宏坤(通信作者), 男, 1974 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为故障诊断、智能运维、数字孪生。

E-mail: lihk@dlut.edu.cn

魏代同, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为结构动力学、数字孪生、故障诊断。

E-mail: wdt2020@mail.dlut.edu.cn

陈玉刚, 男, 1989 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为转子动力学、振动抑制、故障诊断。

E-mail: cyg@dlut.edu.cn

许书本, 男, 2000 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为结构动力学、信号处理、故障诊断。

E-mail: xushubeng@mail.dlut.edu.cn