

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.01.03

旋转叶片叶尖定时测量技术研究综述

段发阶, 牛广越*, 刘昊, 秦浩玮, 李发富, 周琦

(天津大学 精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072)

摘要: 叶片振动参数是影响航空发动机、燃气轮机等重大旋转装备工作效率和运行安全的关键, 基于叶尖定时的叶片振动测量方法已成为监测旋转叶片健康状态的标配技术。介绍了叶尖定时(Blade Tip Timing, BTT)测量原理, 阐述了系统典型结构及常用测量流程, 归纳了叶尖定时测量的4大关键技术, 包括叶片到达时刻高精度提取、高信噪比的叶片振动位移测量、极度欠采样的叶片振动参数辨识、基于小样本叶尖定时信号的叶片故障诊断, 详细分析了叶尖定时测量方法在叶尖定时传感技术、振动参数辨识技术、叶片故障诊断技术方面取得的重大进展, 提出了叶尖定时技术的发展趋势与展望, 从传感信号复用、不确定度分析与校准、系统的机载应用、数字孪生及智能运维4个方面总结了叶片振动非接触测量领域的未来重点研究方向, 有望为叶尖定时测量技术的科学发展与工程应用提供重要参考。

关键词: 旋转叶片; 叶尖定时; 叶片振动; 传感器; 故障诊断

中图分类号: TB936; V241.9

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 01-0045-20

A review of blade tip timing measurement technologies of rotating blades

DUAN Fajie, NIU Guangyue*, LIU Hao, QIN Haowei, LI Fafu, ZHOU Qi

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Blade vibration parameters are crucial for influencing the operational efficiency and safety of major rotating equipment such as aero-engines and gas turbines. The blade vibration measurement method based on blade tip timing has become a standard technology for monitoring the health status of rotating blades. This article introduces the principle of blade tip timing measurement, describes the typical structure of the system and common measurement processes, and summarizes four key technologies of blade tip timing measurement, including high-precision extraction of blade arrival time, high signal-to-noise ratio blade vibration displacement measurement, extremely under-sampled blade vibration parameter identification, and blade fault diagnosis based on small-sample tip timing signals. It analyzes in detail the significant progress made in blade tip timing measurement methods in terms of blade tip timing sensing technology, vibration parameter identification technology, and blade fault diagnosis technology. It proposes the development trend and prospects of blade tip timing technology, and summarizes the future key research directions in the field of non-contact blade vibration measurement from four aspects: sensing signal multiplexing, uncertainty analysis and calibration, on-board application of systems, digital twin and intelligent operation and maintenance. It is expected to provide important

收稿日期: 2024-12-13; **修回日期:** 2025-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52205573, U2241265); 中国博士后科学基金项目(2022M720106); 天津大学科技创新领军人才培育“启明计划”项目(2024XQM-0012); 精密测试技术及仪器全国重点实验室(天津大学)青年教师科研启动项目(Pilq2304); 国家科技重大专项项目(J2022-V-0005-0031)

引用格式: 段发阶, 牛广越, 刘昊, 等. 旋转叶片叶尖定时测量技术研究综述[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 45-64.

Citation: DUAN F J, NIU G Y, LIU H, et al. A review of blade tip timing measurement technologies of rotating blades[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 45-64.



references for the scientific development and engineering application of blade tip timing measurement technology.

Key words: rotating blades; blade tip timing; blade vibration; sensors; fault diagnosis

0 引言

航空发动机^[1]、燃气轮机^[2]、汽轮机^[3]、烟气轮机^[4]等大型旋转机械是关乎国家安全的核心重大装备,广泛应用于能源化工、航空航天、军事国防等关键领域。旋转叶片作为重大装备的核心做功部件,在承受离心载荷的同时还受外部高温、高压气体冲击及腐蚀等极端工况的影响。极端恶劣的工作环境导致叶片极易发生振动,承受交变应力作用,在高次循环下发生高周疲劳失效,进而导致叶片萌生裂纹,直至造成叶片断裂故障,严重威胁旋转机械的安全高效运行^[5-8]。据统计,40%以上的航空发动机外场故障均与各类叶片故障有关^[9],1975—2002年,我国军用重点型号涡喷发动机事故中,由叶片故障引起的事故多达69起,造成了严重后果^[10]。鼓风机、汽轮机、烟气轮机等其他大型旋转机械同样面临叶片事故频发问题,美国电力研究所的统计结果表明:电厂大型旋转机械的重大事故中,每年至少有40起与叶片故障相关,其中叶片断裂导致的汽轮机停机事故占总体停机事故的70%以上^[10]。叶片振动是评估叶片健康状态最直接的指标,因此,实时监测叶片振动状态并在线测量其振动参数,可以有效预警叶片失效,防止叶片疲劳断裂,从而保障重大装备的安全、稳定与可靠运行。

发动机叶片在极端恶劣环境下的振动状态难以通过理论计算获得精确结果,因此,需进行叶片振动参数的在线测量。旋转叶片振动在线测量方法可分为接触式和非接触式两大类,其中,接触式测量方法最先被研究人员提出。自20世纪30年代起,美国西屋公司基于光路反射法,在叶片上粘贴反光镜进行叶片振动测量,尽管该技术在叶片振动测试领域应用了20余年,但其对光路环境清洁度的要求较高,难以应用于发动机复杂现场环境。20世纪50年代起,应变片法成为接触式测量方法中的主流技术,也是目前旋转叶片振动测量领域应用最广泛、最成熟的方法;然而,应

变片粘贴在叶片表面会对叶片结构特性及工作状态产生影响,且仅能测量叶盘的部分叶片^[11],并且应变片在极端环境下故障率较高。

非接触式测量方法从20世纪60年代起逐渐兴起,应用该类方法时,通常将传感器安装于动叶片顶部上方的机匣处,通过分析叶片经过传感器时的振动信号实现振动测量,其中研究较多的方法包括激光多普勒法^[12]、声响应法^[13]、轴系/机匣振动推断法^[14-15]、叶尖定时法。激光多普勒法需要较大的测量装置安装空间,且对环境要求较高。声响应法和轴系/机匣振动推断法无法实现叶片振动的直接测量,测量结果往往存在较大误差。叶尖定时原理最早于20世纪60年代由苏联萨勃洛斯基提出^[16],后经英国Rolls-Royce公司的首席工程师RUSSHARD P和美国Pratt & Whitney公司的讲席教授Robert Gao等行业专家实验验证^[17],已成为监测旋转叶片运行状态的有效手段及标配技术。近年来,基于叶尖定时原理的叶片振动参数监测方法,因具有非接触、低介入、全级叶片测量的优势,受到高度重视和大力发展,已被欧美国家列入航空发动机试验大纲^[18]。

自“十二五”规划实施以来,我国先后启动了国家重点基础研究发展计划(973计划)、航空发动机和燃气轮机重大专项(“两机”专项)、国家重点研发计划项目。在航空发动机、燃气轮机、汽轮机等重大装备向高端化、智能化、绿色化方向发展的大背景下,我国全面部署并开展了基于叶尖定时原理的叶片振动测量系统的研发工作。旋转叶片振动参数叶尖定时测量已成为我国航空发动机测试大纲中的必备项目^[19]。基于叶尖定时原理的叶片振动测量方法研究,旨在实时监测叶片健康状态,实现叶片典型故障诊断,对于提升重大装备工作效率并保证运行安全具有重要意义和工程价值。

本文系统综述旋转叶片叶尖定时测量技术的研究情况。首先,介绍叶尖定时测量原理,梳理叶片振动类型及特征、叶尖定时的基本概念、叶

片振动的测量流程；之后，探讨叶尖定时测量的关键技术，包括叶片到达时刻高精度提取、高信噪比的叶片振动位移测量、极度欠采样的叶片振动参数辨识、基于小样本叶尖定时信号的叶片故障诊断；接着，介绍叶尖定时方法的研究进展，分别对光纤法、电容法、电涡流法、微波法的基本原理及研究现状进行详细阐述；最后，对叶尖定时测量的发展趋势进行展望，提出传感信号复用、不确定度的分析与校准、系统的机载应用、数字孪生技术及智能运维等几项未来的研究方向。

1 叶尖定时测量原理

1.1 叶片振动类型及特征

旋转叶片振动类型根据激励方式的不同，可分为自由振动、受迫振动及自激振动^[20]；根据振动频率与转速频率的倍数关系，可分为同步振动及异步振动^[21]；根据叶片振型不同，又可分为弯曲振动、扭转振动及复合振动^[22]，如图1所示。在旋转叶片运行过程中，周期性变化的振动应力是引起叶片振动的主要原因，叶片在外界激励源作用下极易产生受迫振动；由于非线性反馈作用，叶片自行发生持续振动，产生颤振等自激振动现象。引起叶片产生振动应力的激励源主要包括机械激励源、叶片旋转失速激励源、气流激励源。其中，机械激励源由重大装备的机械传动系统产生；气流激励源由流场的动静干涉产生，该激励源的周向位置基本不变或变化缓慢，容易导致叶片发生同步振动；旋转失速激励源则是在机械低转速下流经叶片的气流攻角变化引起的，此时失

速区旋转方向与转子旋转方向相反，容易导致叶片发生异步振动。同步振动与异步振动在叶尖定时信号上有不同的表征，需采用不同的信号处理算法进行分析；此外，叶片的振型与其固有频率密切相关，具体表现为叶片的叶身节线位置和数量、叶端位移等方面均有显著差异。叶片振动的具体分类以及相应名称总结如表1所示。

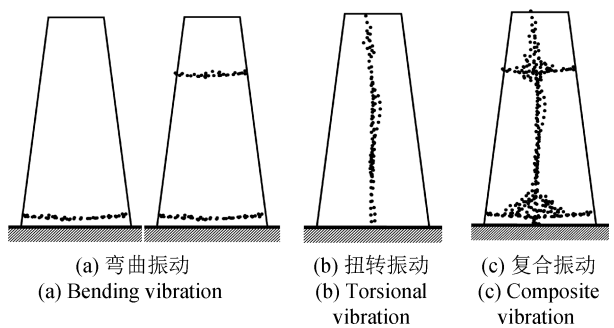


图1 典型的叶片振型图
Fig.1 Typical blade vibration mode shapes

图2展示了某型重大装备中不同类型的旋转叶片，根据叶片形貌可将其分为自由叶片和带冠叶片两种类型。自由旋转叶片的振动响应常采用单自由度振动响应分析方法进行研究，叶片发生简谐振动，但由于叶片的失谐设计，相邻叶片振动模态极易耦合，这给振动参数辨识算法带来了模态解耦的难题。此外，叶片所在的叶盘会发生节径振动，特别是带冠叶片结构，如汽轮机低压末级长叶片，这类叶片的叶冠与叶冠之间通过互锁结构紧密连接，在旋转周向方向难以产生位移，主要发生轴向方向的弯曲振动^[23-24]。叶冠的存在在对叶尖定时信号的获取提出了更高的技术要求。

表1 旋转叶片振动类型
Tab.1 Vibration types of rotating blades

分类依据	叶片振动名称	说明
激励方式	自由振动	叶片在无外力作用下的简谐振动
	受迫振动	叶片受迫在外界周期交变载荷作用下产生的振动
	自激振动	叶片受自激力作用所产生的振动
振动频率与转速频率的倍数关系	同步振动	振动频率和转速频率呈整倍数关系
	异步振动	振动频率和转速频率呈非整倍数关系
叶片振型	弯曲振动	弯振的节线方向垂直于径向方向
	扭转振动	扭振的节线与径向方向一致
	复合振动	复合振动是弯振和扭振的组合

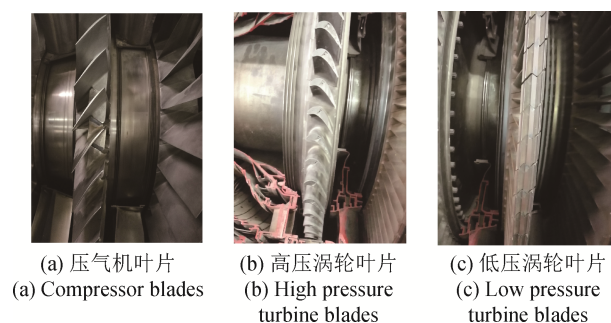


图2 重大装备典型叶片

Fig.2 Typical blades of major equipment

旋转叶片的振动参数主要包括频率、振幅、阻尼、常偏量、相位等。其中，对于振动频率参数，当叶片发生共振时，外界激励频率等于叶片固有频率，工程中常用坎贝尔图(如图3所示)直观反映叶片在全转速范围内振型、共振区及倍频(Engine Order, EO)等信息^[21]。对于振幅参数，当叶片振动幅值较大时，极易引发疲劳失效，通过实时在线监测叶片振幅变化，可实现叶片故障预警^[25]。对于其他参数，叶片阻尼系数则与其品质因数密切相关；常偏量反映了气动力作用下的叶片变形情况，可用于分析叶片裂纹故障^[26]；振动初相位与激振源的周向位置有关，可用于分析流场周向畸变^[27]。国内某航空发动机预研单位的研究成果表明^[28]：为实现高阶振动几十 μm 的振动幅值测量，叶片振动位移测量误差应不超过 $10 \mu\text{m}$ ，同时为实现叶片疲劳的早期预警，在对整级叶片进行全寿命监测过程中，叶片振动频率测量误差应不超过 1 Hz 。

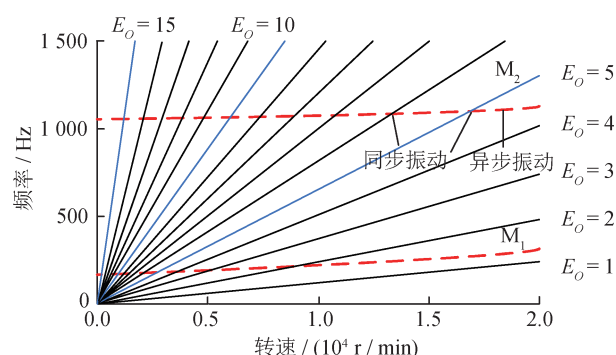


图3 叶片坎贝尔图

Fig.3 Blade Campbell Diagram

1.2 叶尖定时的基本概念

叶尖定时测量原理如图4所示，叶尖定时测量方法基于旋转叶片在振动和非振动条件下到达传感器的时间差，实现叶尖振动位移监测^[29]。转速同步传感器安装在转轴附近，通过监测转轴上键相标记到达时间，为测量系统提供计时基准。

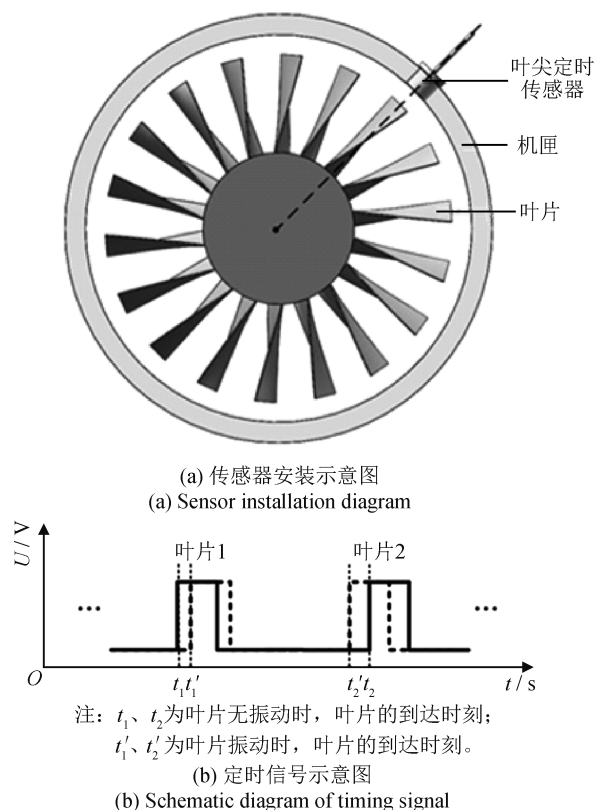


图4 叶尖定时测量原理

Fig.4 Principle of blade tip timing measurement

当叶片发生振动时，叶尖定时传感器监测的时间脉冲与未振动时的时间脉冲相比，会提前或滞后1个时间差 Δt 。令叶片未振动时到达传感器的时间为 t_1 ，发生振动时到达传感器的时间为 t'_1 ，则时间差 Δt 可表示为

$$\Delta t = t'_1 - t_1 \quad (1)$$

若令叶端与转轴中心距离为 R ，转子转速角速度为 ω_r ，则此时叶尖振动位移 y 可表示为

$$y = \omega_r R \cdot \Delta t \quad (2)$$

叶尖振动位移作为原始数据，通过输入给后续的叶片振动参数辨识算法，即可实现基于叶尖定时测量原理的叶片振动参数辨识。

由于转速同步传感器安装复杂，且存在脱落

击伤转子风险,自2014年起,国内外研究团队先后提出线性拟合法^[30]、传感器基准法^[31]、叶片基准法^[32]等无转速同步测量方法。无转速同步测量的本质是从叶片到达时间信号中提取虚拟的到达时间基准,进而实现叶片振动测量。该方法无需安装转速同步传感器,叶尖定时传感器的安装分布及测量原理保持不变。

1.3 叶片振动的测量流程

叶尖定时测量系统的典型结构如图5所示,其主要包括叶尖定时传感器、驱动及调理模块、采集模块、上位机等部分^[33]。传感器安装在机匣上,驱动及调理模块一方面用于激励传感器产生测量信号,另一方面用于接收传感器的监测信号,进行放大、滤波等信号调理,并将调理后的信号传输至采集模块。在采集模块中,系统首先对调理信号进行去噪平滑处理,经阈值电压比较后,生成数字电平脉冲信号。为解决叶端形貌差异、转速变化、测量环境噪声等因素导致的数字电平脉冲信号宽度不一致问题,系统对数字电平脉冲信号进行整形和窄化处理。利用固定脉冲填充方法计算脉冲信号的时间间隔,从而获取叶片到达时间。采集模块通过数据传输协议将叶片到达时间发送到上位机,上位机将到达时间转换为叶片振动位移,并对叶片振动位移进行降噪滤波、趋势项消除等预处理操作。随后,利用参数辨识算法实现叶片振动测量,并在人机交互界面显示振动

波形、频谱分析等结果,同时叶片振动数据被存储于硬盘中,以便后续离线分析处理。此外,采集模块可配备数据全采集功能,调理信号经过模数转换后发送到上位机,由上位机计算信号幅度,并通过数模转换控制阈值电压的比较电平,保证每个叶片的到达时刻均能被获取。

2 叶尖定时测量的关键技术

2.1 叶片到达时刻高精度提取

叶片典型故障所引起的叶片振动参数变化微小,反映在叶尖振动位移上的量级也很小。根据叶尖定时测量原理可知,叶片到达时刻鉴别的准确性直接影响叶尖定时系统的测量精度。

从传感技术角度分析,宽带宽的传感信号可显著降低信号噪声并提高时间分辨力,因此应用高精度传感器和宽带宽信号调理电路是实现叶片振动参数高精度在线测量的前提。从叶片到达时间的获取角度分析,鉴别叶片到达时刻是获取叶片到达时间乃至叶片振动位移的关键。传统的叶片到达时刻提取方法采用前沿时刻鉴别(Leading Edge Discrimination, LED)法,将模拟电平的原始叶尖定时脉冲信号与阈值电压进行比较,生成数字电平脉冲信号,并将脉冲上升沿作为叶片到达时刻。然而,信号噪声以及叶尖间隙的变化将引入定时时刻的鉴别误差,因此,需研究对噪声和间隙变化不敏感的叶片到达时刻高精度提取方法^[34-35]。恒定比时刻鉴别法,通过选取当前叶尖间隙下接收信号峰值的恒定比例作为触发电平,并动态调整触发电平,使不同叶尖间隙下的叶片到达时刻能保持固定,从而消除间隙变化的影响^[36]。双边沿时刻鉴别法是前沿时刻鉴别法的改进方案,将传感器信号与阈值电压进行比较,获得定时脉冲的2个边沿,并利用双边沿的比例关系消除信号幅度的影响^[37]。此外,基于数据全采集技术,可采用质心法实现叶片到达时刻的高精度提取,该方法基于脉冲信号幅值平方的加权平均值,求解质心对应时刻,实现叶片到达时刻获取,可有效利用信号全波形信息提高叶片到达时刻鉴别精度^[38-39]。

在实际工程应用中,基于转速同步传感器的叶尖定时测量系统易产生数据“变圈”现象,为

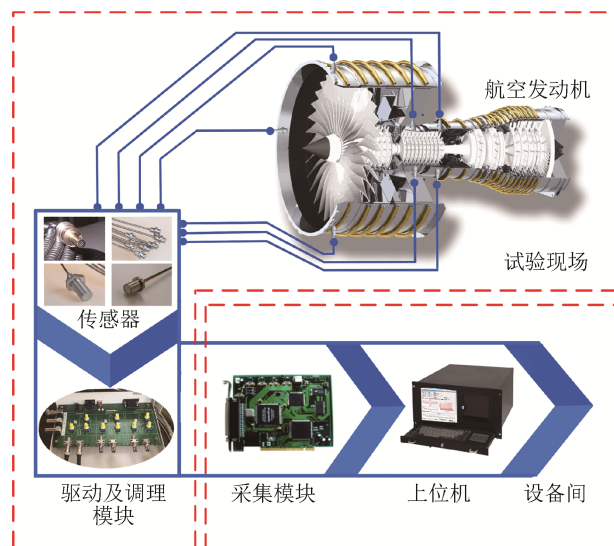


图5 叶尖定时测量系统典型结构

Fig.5 Typical structure of blade tip timing measurement system

解决采集过程中叶尖数据“越过”转速同步数据的问题,需进行数据变圈预处理,利用“多优少补”原则,解决叶片数据偶然丢失问题^[10],也可以利用预设时间窗宽度的方法对到达时间异常信号进行筛选,实现对叶片到达时间序列的预处理^[40]。

2.2 高信噪比的叶片振动位移测量

原始的叶片振动位移数据由叶片到达时间获取,数据量大、含噪声多,难以直接用于振动参数辨识。振动位移数据预处理、数据段筛选等工作是开展振动参数辨识的基础。高信噪比的叶片振动位移测量主要包括数据对齐、滤波降噪、趋势项拟合、振动事件定位识别等。

将叶片到达时间转换为叶片振动位移后,因为不同位置传感器检测的叶片到达时间序列与实际叶片序号并不完全一一对应,所以需要对不同传感器监测的叶片振动数据序列进行对齐。利用叶片与传感器的夹角以及所有传感器的周向安装角度,将振动位移序列排序,实现传感器监测的所有叶片振动序列的对齐^[29]。同时,基于叶片间夹角的指纹图谱序列或者叶尖间隙序列,实现振动数据中的叶片序号与实际叶片物理序号的精准对应^[33]。

滤波降噪主要用于去除来自测量环境以及测量系统的随机噪声,这对后续参数辨识及叶片振动事件的准确定位具有重要作用。常用的滤波降噪方法包括滑动平均法、Savitzky-Golay平滑算法、基于相邻传感器的振动位移数据差分方法、数字滤波法、小波变换法等^[41],这些方法能够有效去除与振动位移信号相混叠的噪声,保留信号的突变特性。

趋势项拟合用于消除旋转叶片在不同工况下的静态偏转位移,将叶片振动位移波形平移至零值水平线附近,以便更清晰地分析叶片振动特性。目前,趋势项拟合方法包括人工截取特定数据段进行趋势项拟合、利用固定窗宽度对叶片振动位移曲线进行多项式拟合、趋势项自适应调整窗宽度拟合方法^[42],在恒加速度、变加速度条件下能有效消除叶片偏转位移。

振动事件定位识别是实现叶片振动参数快速辨识的关键与前提,仅依靠工程师人工筛选振动

数据段,效率低下,易掺杂主观因素,不利于叶片振动参数快速、高效辨识。目前,叶片振动事件自动定位方法包括基于同一枚叶片相邻圈振动位移的相关系数法、基于整级相邻圈叶片夹角序列的相关系数法、基于拟合椭圆面积的振动事件定位法、基于奇异值分解的振动事件识别^[29, 43-45],振动事件自动识别还关注了各类方法的抗噪声干扰能力以及定位准确性。

2.3 极度欠采样的叶片振动参数辨识

叶片振动频率、幅值等振动参数直接反映了叶片的健康状态。基于叶端传感获取的叶片振动位移数据,准确辨识叶片振动参数是实现基于叶片振动参数故障诊断的关键。根据叶尖定时测量原理,叶片振动参数辨识面临着以下关键问题:①单只传感器定时信号的采样频率为转速频率,而叶片振动频率常远高于转速频率(几倍至百倍),叶尖定时信号是一种极度欠采样信号,特别是对于叶片同步振动,其欠采样程度相较异步振动更加严重。理论上,恒速下的振动位移采样值不变,这进一步增加了振动参数辨识的难度^[21];②叶尖定时传感本质上为被动采样,仅在叶片端部到达传感器的时刻才触发定时信号。在实际工况中,由于转速变化,不同旋转周期采样间隔不同,属于非等间隔采样,现有的辨识算法常认为叶片旋转1圈时间内转速恒定且采样间隔均匀^[46],该近似处理会引入算法误差;③传感器布局(数量及安装角)是影响叶尖定时算法辨识结果的重要因素。传感器安装角度和叶片振动倍频共同决定了传感器对振动信号的采样点位置,所有叶尖传感器在振动圆周内采样点的分布角间隔是否足够大,将影响振动参数辨识的准确性;④传统叶尖定时测量方法需要安装转速同步传感器^[47],费时费力,且由于转速同步传感器与叶尖定时传感器不在同一轴截面上,轴系扭转容易导致转速不稳,引入系统测量误差;⑤叶片的裂纹、碰摩、外物损伤等故障常表现为叶片振动位移、振动频率发生微小变化^[26, 48],因此叶片振动参数辨识精度需进一步提高。特别是在发动机喘振状态下,叶片振动持续时间较短,给参数辨识带来了难度。因此需研究无转速同步的叶片振动参数辨识方法,建立叶

尖定时非等间隔采样和转速不稳的高精度补偿及修正模型,实现叶片振动信号的高保真重构。

2.4 基于小样本叶尖定时信号的叶片故障诊断

在以航空发动机为代表的旋转机械中,旋转叶片故障可能造成巨大灾难。典型的旋转叶片故障包括裂纹、碰摩、外物损伤、喘振、颤振等。叶片故障发生时间通常较短,收集到的故障数据样本有限,例如在发动机喘振时,为保证装备运行安全,数秒内立即退喘,采集的故障数据样本较少。同时,叶尖定时方法作为一种极度欠采样测量方式,进一步减少了故障数据样本,使得基于原始叶尖定时信号直接进行故障诊断效果不佳。因此,亟须突破基于小样本叶尖定时数据的叶片故障诊断技术。

由于原始叶尖定时信号的故障数据样本较少,需要更充分挖掘小样本叶尖定时数据反映的故障特征。基于旋转机械叶片振动信号,可以提取反映叶片运行状态的时域、频域、时频域等典型特征,同时提取反映振动特性的相关系数、奇异值等叶尖定时信号泛特征,将典型特征与泛特征相结合,构建多维度多元特征空间。由于不同叶尖定时信号泛特征之间具有相关性和冗余,直接组合各特征可能会导致效果不佳,需要采用特征抽取方法,如成分分析方法、判别分析方法、流形学习方法等^[49-51],通过空间变换,将原始特征重新组合得到新的特征,降低原始特征中的冗余和噪声,提高机器学习性能。根据特征选择与训练过程的关系,分析过滤式、包裹式、嵌入式三类特征选择方法^[52-53],在不改变原始特征空间的前提下,选出特征集的最优子集。

构建分类精度高、泛化能力强、鲁棒性好的机器学习模型是实现叶片故障诊断的关键。原因:首先,由于叶尖定时信号的小样本特性,不适合采用需海量训练数据的深度学习方法,通过提取叶尖定时信号泛特征并结合浅层机器学习的方法更加适用;其次,在工程应用中,旋转机械发生故障后,技术人员会及时分析故障事件,并根据故障过程赋予不同故障类型标签,所以旋转叶片故障诊断是一种有监督的学习方式;再次,因旋转机械工况复杂,故障类型多样,需构建多分类

的故障诊断模型;最后,为实现典型故障的准确诊断,模型应具有良好的泛化能力,避免过拟合现象的发生。

3 叶尖定时测量方法的研究进展

3.1 叶尖定时传感技术研究

基于叶尖定时的航空发动机叶片振动参数测量方法发展至今,其传感技术丰富多样。根据工作原理不同,典型的叶尖定时传感方法包括光纤法^[54-57]、电容法^[58-59]、电涡流法^[60-63]、微波法^[64-65]。

3.1.1 光纤法

光纤法作为一种基于反射式强度调制原理的光纤传感技术,是目前叶尖定时信号检测中应用最广泛的传感方法,其工作原理如图6所示。光纤式叶尖定时传感器通常由1支发射光纤和分布在周围的6支接收光纤组成光纤束,发射光纤和接收光纤形成Y型结构。当旋转叶片经过传感器探头时,接收光纤接收到叶尖反射光,并通过调理电路将光信号转换为电信号输出。基于反射式强度调制原理的光纤式传感器不受光纤色散效应的影响,因此在实际应用中通常采用多模光纤作为发射光纤和接收光纤。

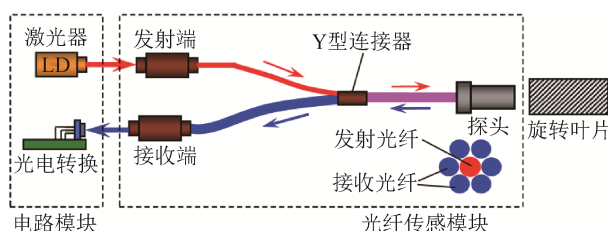


图6 光纤式叶尖定时传感原理

Fig.6 Principle of optical fiber-based blade tip timing sensing

反射式强度调制原理最早由美国 DHADWAL H S 于1996年提出,用于航空发动机风洞试验验证^[66]。美国 Hood Technology 公司和 Agilis Engineering 公司、英国 EMTD Measurement 公司均已开发出了工程级光纤式叶尖定时传感器^[18, 67-68]。国内的天津大学段发阶团队及善测(天津)科技公司的科研人员研制了光纤式传感器及测量系统,并成功应用于航空发动机台架试验^[69-70]。

光纤式传感方法具有探头体积小、测量带宽宽、抗电磁干扰能力强、测量精度高等优势;但

该方法对工作环境清洁度要求较高,不能在污染环境使用,因此光纤式传感器常应用于航空发动机风扇、压气机等冷端部件的叶尖定时测量。

3.1.2 电容法

电容法基于双极板电容器原理实现叶尖定时传感,通过传感器芯极与叶尖构成的电容极板间电容变化来检测叶片到达信息,工作原理如图7所示,电容式传感器探头采用“伪三同轴”结构,由芯极、内屏蔽、外屏蔽、绝缘层组成。

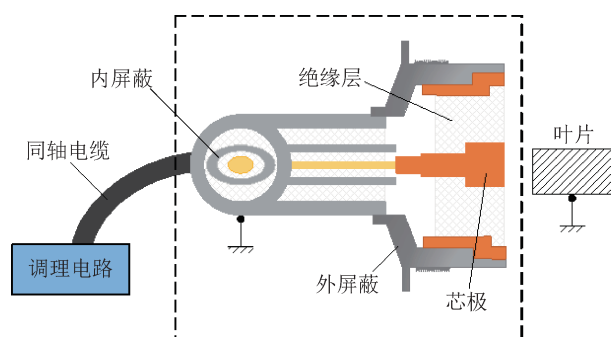


图7 电容式叶尖定时传感原理
Fig.7 Principle of capacitive tip timing sensor

根据信号调制方法的不同,电容式传感方法分为调幅法和调频法,由美国学者BARRANGER J P分别于1978年和1987年率先提出^[71-72]。目前,法国FOGALE公司研制的电容式传感器最为成熟,其非冷却式和冷却式传感器耐温分别高达1 300 °C和1 400 °C^[73]。国内的天津大学段发阶团队研究了电容式传感器,其耐温能力达到了国外同等水平^[61]。

电容式传感方法探头耐温能力强,能够在恶劣环境中工作;但该方法在传感带宽、测量精度方面存在一定局限性,同时探头尺寸会随量程增大而急剧增加。

3.1.3 电涡流法

电涡流法基于电磁感应原理实现叶尖定时传感,当被测导体叶片在磁场中做切割磁感线运动时,叶片表面产生感应电流,即电涡流,从而在传感器内部线圈产生相应的电信号。根据磁场产生方法不同,电涡流式传感方法可分为主动法和被动法^[74]。基于主动法的电涡流式传感器线圈内部通有直流电流,产生磁场,因此又称励磁式法,其工作原理如图8(a)所示;基于被动法的电涡流

式传感器则通过永磁体产生磁场,又称磁电法,其工作原理如图8(b)所示。

基于被动法的电涡流式传感方法最早由美国学者RICKMAN J于1982年提出^[75],主动法则从2010年开始蓬勃发展。英国QinetiQ公司和Moni-tran公司、美国Hood Technology公司均已研制出工程级电涡流式传感器产品^[18, 76-77]。国内的天津大学段发阶团队和北京化工大学王维民团队提出了宽带电涡流式传感方案^[69, 78]。

电涡流式传感器不受蒸汽环境影响,能够实现汽轮机蒸汽环境下的叶片振动测量,并且当旋转机械机匣采用非铁磁性材料时,电涡流式传感方法无需在机匣开安装孔,即可实现无损检测;但该方法存在居里点热效应,耐温能力较弱,同时传感器探头体积通常较大,测量灵敏度和精度较差。

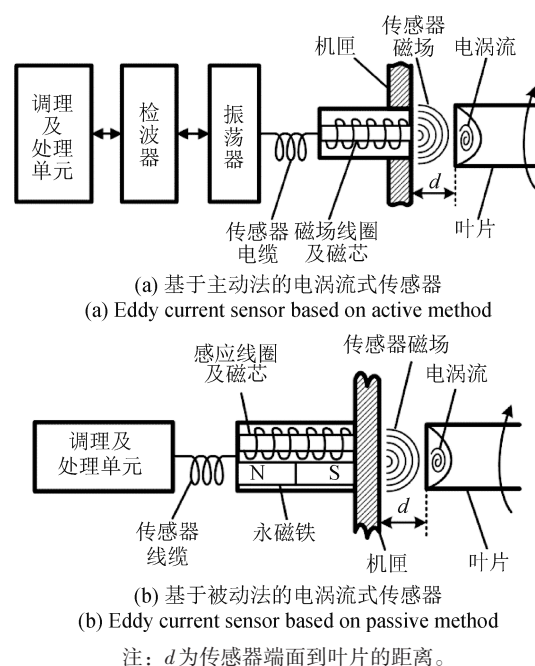


图8 两种电涡流式传感方法示意图

Fig.8 Schematic diagram of two eddy current sensing methods

3.1.4 微波法

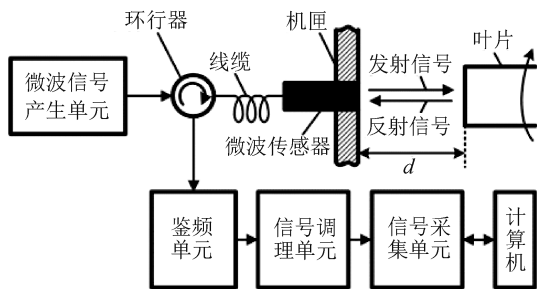
微波式叶尖定时传感原理与短程雷达系统类似,传感器发射微波信号,当叶片通过时,监测到叶尖的反射微波信号,如图9所示。

微波式传感方法最早由德国学者WAGNER M于1998年提出^[79]。德国Siemens公司和美国Meggit

公司已成功研制出可实现叶尖定时及叶尖间隙同时测量的微波式传感器^[74, 80]。国内的研究相对滞后,天津大学牛广越基于单频连续波微波测距方法,突破了叶尖间隙与叶片振动同时测量的关键技术,但暂未开展工程性试验验证^[65, 80-82]。

微波式叶尖定时传感方法具有抗烟尘干扰能力强、探头耐高温性能优异、测量量程较大等优势,但测量精度易受空间滤波效应影响。

各类典型叶尖定时传感器的工作原理和优缺点如表2所示。



注： d 为传感器端面到叶片的距离。
图9 微波式叶尖定时传感原理

Fig.9 Principle of microwave tip timing sensor

3.2 基于叶尖定时的叶片振动参数辨识研究

根据叶片振动频率与转速频率关系,叶片振动可分为同步振动和异步振动,其叶尖定时信号欠采样程度不同,叶尖定时信号特性存在差异。特别是叶片同步振动时,采样频率与叶片振动信

号频率呈整数倍关系,欠采样效应导致混叠频率折叠至零频,这一现象严重制约了频谱分析方法在辨识同步振动参数中的应用。

3.2.1 同步振动参数辨识

同步振动是由机械效应(如转子不平衡、不对中)或气流压力分布不均衡引起的。与异步振动相比,同步振动更难测量,因为叶尖定时传感器在每圈测量中获得的叶片振动位移相同。

对于同步振动的参数辨识问题,国内外科研人员相继提出单参数法、双参数法、自回归法、任意角法、周向傅里叶拟合法等方法。单参数法最早于20世纪70年代由苏联学者萨勃洛斯基提出,该方法通过变速扫频,基于单支传感器采集到的叶尖定时信号,利用单参数法的目标函数进行曲线拟合,结合坎贝尔图等先验知识,实现振动幅值、频率、相位、常偏量的辨识^[44, 83-84]。2000年,英国学者HEATH S提出了双参数法,该方法利用双传感器,通过椭圆拟合方法实现振动参数辨识^[85-87]。2006年,美国学者JOUNG K K提出了周向傅里叶拟合法,该方法将单圈多传感器测量值构成超静定方程,采用最小二乘法求解叶片振动参数^[88],之后其他学者对该方法进行了进一步优化改进^[89-90]。2007年,英国学者GALLEGO G J提出了自回归法,该方法利用等夹角分布的叶尖定时传感器提高采样频率,基于自回归原理辨识振动参数^[91-92]。2011年,天津大学段发阶研究团

表2 各类型叶尖定时传感方法对比
Tab.2 Comparison of different types of tip timing sensing methods

类型	传感元件	工作原理	性能指标	优点	缺点
光纤式	光纤	收集反射光强并进行光电转换	耐温: 650 ℃/1 100 ℃(带冷却) 振动频率测量误差: 1 Hz 振动位移测量误差: 10 μm	抗电磁干扰能力强, 柔韧性好, 带宽较宽	带宽较宽, 但易受背景光的干扰, 耐污染能力差
电容式	电容电极	电极运动引起电容量值的变化	耐温: 1 300 ℃/1 500 ℃(带冷却) 振动频率测量误差: 2 Hz 振动位移测量误差: 30 μm	耐高温, 不易受烟尘影响	易受寄生和分布电容的影响, 带宽较窄
电涡流式	电感线圈	电涡流感应	耐温: 300 ℃/650 ℃(带冷却) 振动频率测量误差: 2 Hz 振动位移测量误差: 30 μm	灵敏度高	不耐高温环境, 高温条件下测量误差较大, 抗电磁干扰能力差
微波式	电磁波	电磁波反射强度	耐温: 1 300 ℃ 振动频率测量误差: 2 Hz 振动位移测量误差: 30 μm	受烟、尘等影响小, 耐高温环境	带宽较宽, 易受空间滤波效应影响

队提出了任意角法,该方法结合单参数法辨识的叶片振动相位信息,利用不同传感器的相位差,通过倍频遍历辨识振动倍频数及振动频率^[21];该团队针对叶片振动倍频辨识难题,提出了倍频遍历-周向傅里叶拟合方法^[93],实现了叶片同步振动频率辨识;随后,该团队和西安交通大学陈雪峰研究团队基于曲线拟合思想,提出了无转速同步叶片同步振动参数辨识方法^[31-32, 94],解决了无转速同步条件下叶片同步振动参数辨识难题。此外,英国 Rolls-Royce 公司专家 RUSSHARD P 提出了线性拟合无转速同步叶尖定时测量方法^[30];北京化工大学王维民团队在无转速同步线性拟合的基础上,进一步提出了改进的线性拟合无转速同步叶尖定时测量方法^[95],实现了无转速同步条件下叶片振动位移快速计算。近年来,单传感器叶片同步振动参数识别技术成为研究热点,西安交通大学杨志勃团队和国防科技大学胡海峰团队分别提出了基于采样混叠频率图^[96-97]以及基于原始全波形分析的单传感器参数辨识方法。

3.2.2 异步振动参数辨识

异步振动是由于颤振、旋转失速或喘振引起的^[98]。异步振动参数辨识方法的目标是从叶尖定时测量得到的振动位移数据中识别非整数阶次共振的幅度和频率。在异步参数辨识过程中,振动幅值的获取较为容易,但由于采样率低、转速波动、频谱混叠的原因,频率识别较为困难。

异步振动参数辨识方法主要分为频谱分析方法、空间类方法、信号重构方法3种。在频谱分析方法方面,包括多速率采样法(如均布法、5+2法)、延时采样法(如小角度法)、全相位傅里叶变换法(如任意角法)、最小方差法^[99]、非等间隔傅里叶变换^[100]、交叉谱方法等。均布法由德国学者 ZIELINSKI M 于2000年提出,该方法通过多传感器提高有效采样频率^[101]。在此基础上,天津大学欧阳涛、王宇华、方志强等人相继提出了5+2法^[102]、小角度法^[103]、任意角法^[21]。5+2法将三均布和五均布传感器结合安装,通过不同传感器的多速率采样,实现了除15倍频外任意倍频的参数辨识;小角度法利用2支小夹角传感器的延迟采样特性辨识振动参数;任意角法则通过全相位傅里

叶变换准确辨识混叠频率及相位,基于不同传感器相位信息,通过倍频遍历实现振动倍频数及振动频率辨识。最小方差法利用叶尖定时信号自相关矩阵的最小方差,估算叶片振动多频率成分,这种方法无需依赖叶片振动先验知识,但其频率分辨力较低。非等间隔傅里叶变换方法突破了传感器周向均匀布置的限制,但其可分析的叶片振动频率带宽仍然有限。交叉谱分析方法通过多组传感器频率分析结果的相关性分析有效滤除噪声干扰,但其频率分析结果必须依赖叶片振动先验知识。

空间类方法包括旋转不变子空间法和多重信号分类法两种。旋转不变子空间法由天津大学李孟麟等人于2010年引入叶尖定时领域,该方法基于2个叶尖定时传感器构成有延迟的双通道系统,实现了频率估计解模糊和振动频率辨识^[104]。多重信号分类法由西安交通大学陈雪峰团队于2020年引入叶尖定时领域,该方法基于信号空间和噪声子空间的正交性,通过优化传感器布局,克服了欠采样导致的频谱混叠问题^[105-106]。

信号重构方法包括插值重构法和稀疏重构法两种。插值重构法由法国学者 SALHI B 于2008年提出,该方法基于高阶B样条函数构建插值核函数的带限信号重构方法,实现叶片振动信号重构^[107-108]。稀疏重构法由国防科技大学杨拥民团队于2016年引入叶尖定时领域^[109],叶尖定时信号具有频域稀疏特性,该方法基于压缩感知的稀疏表示理论,提出了叶片多模态振动信号的稀疏重构方法,并相继引入基追踪、正交匹配追踪等优化算法,实现了叶片异步振动参数准确辨识^[110-111]。

3.3 基于叶尖定时的故障诊断研究

叶片典型故障主要分为裂纹、碰摩、外物损伤、喘振、颤振5种,其中,碰摩及外物损伤故障属于脉冲式激励故障,喘振及颤振故障属于流体诱发的流固耦合振动。叶片典型故障会引起叶片振动参数及叶尖定时信号的改变,因此,基于叶尖定时的故障诊断方法分为基于叶片振动参数的故障诊断和基于叶尖定时信号泛特征的故障诊断两方面。

3.3.1 裂纹故障诊断

裂纹故障诊断是叶片健康监测领域的首要研究内容。在基于叶片振动参数的故障诊断方面,裂纹故障会引起振动幅值、频率参数的变化,因此主要通过辨识振幅及频率参数诊断裂纹故障。20世纪70年代,德国MTU公司的研究人员基于自主研发的BSSM叶尖定时系统,通过监测叶片二弯模态振动的最大应力,在共振状态下识别了高阶模态振动导致的高周裂纹^[112]。美国NASA Glenn研究中心和克利夫兰州立大学合作,开展了叶尖定时系统在转子轮盘裂纹故障检测中的应用研究^[113]。韩国学者针对BTT信号欠采样的问题,定义了一个称为马氏距离的统计指标,并将其用于具有裂纹的旋转多叶片系统故障诊断,通过仿真模型获得BTT信号,研究了裂纹的存在和信噪比对所提出方法可靠性的影响^[114]。北京化工大学王维民团队提出了基于非线性最小二乘拟合和全局自回归法相结合的叶片同步振动参数辨识方法,准确捕捉叶片裂纹早期固有频率的微小变化,实现了叶片裂纹故障的预警^[26]。国防科技大学徐海龙通过辨识叶片振幅和频率参数,结合裂纹叶片二倍频响应,实现了裂纹故障诊断^[115]。南非学者DU TOIT R G提出了一种结合模型及数据驱动的混合方法,结合贝叶斯线性回归,通过振幅及频率聚类分析实现裂纹故障诊断^[116]。西安交通大学陈雪峰团队利用幅值、相位变化及叶片间距诊断裂纹故障^[117],提出了一种基于幅值、频率、静位移的聚类分类方法^[118]。西安交通大学乔百杰团队提出一种高分辨力时频分析方法,用于检测裂纹引起的频率偏移^[119]。

在基于叶尖定时信号泛特征的故障诊断方面,国防科技大学杨拥民团队利用叶尖定时信号构建九维特征,并基于主成分分析方法提取了裂纹故障主成分特征,实现了裂纹故障诊断^[120]。印度的RAJENDRAN P团队提出了一种基于小波能量失谐指数的裂纹识别方法,实现了对于叶盘及叶片的裂纹识别^[121]。

3.3.2 脉冲式激励叶片故障

碰摩和外物损伤故障均属于脉冲式激励型叶片故障,碰摩故障为周期性脉冲激励,外物损伤

故障为单次脉冲激励。根据碰摩位置不同,碰摩故障分为单点碰摩、局部碰摩、全周期碰摩3种,而传统的叶尖间隙(Blade Tip Clearance, BTC)测量方法仅能诊断检测测点位置的碰摩故障,具有一定局限性^[74]。叶尖定时方法通过分析叶片振动位移响应特性,实现非测点位置的碰摩和外物损伤故障检测。北京化工大学王维民团队指出叶片发生碰摩故障时,存在转速瞬时掉转现象,并出现低频的大幅振荡^[48],该团队通过与应变片测量结果对比,验证了这一结论的准确性^[122]。西安交通大学陈雪峰团队通过分析单叶片、整体叶片碰摩时振幅及频率特性,实现了碰摩故障诊断^[123]。在外物损伤故障诊断方面,英国CHANA K S团队基于叶片振动频率及幅值变化,对叶片外物损伤故障进行检测^[124]。北京化工大学李涵通过分析振动位移包络及振动频率,提出了外物损伤故障诊断方法^[125]。

3.3.3 流固耦合振动

喘振和颤振是复杂的流固耦合振动,一般由压缩机工况改变引起。一般认为旋转失速是喘振的先兆,当流量减小时,气流以正攻角进入叶片,导致叶背气流分离形成失速团,失速团累积引发旋转失速;当流量进一步减小时,出口压力下降导致气流倒流,倒流气流补充流量不足使气流重新流动,周而复始形成喘振。与喘振不同,颤振是由系统结构或工作条件诱发的流体激励现象,属于自激振动。传统的喘振监测方法一般通过受感部或声阵列传感器实现,基于叶尖定时的故障诊断则通过辨识叶片振动特征频率实现。大连理工大学李宏坤团队研究了失速工况下的叶片振动频率与转速、失速团的关系,并使用压力传感器、应变片和叶尖定时传感器同时检测失速故障^[25, 126]。波兰学者PRZYSOWA R利用频谱分析方法辨识叶片异步振动参数和叶盘节径数,实现了压缩机叶片的健康监测^[127]。在颤振参数辨识方面,捷克学者GEORGIEV V搭建了叶片颤振测试系统^[128];英国EMTD Measurement公司的科研人员指出,颤振发生时所有叶片以相同频率振动,但相位不同,容易形成节径振动模式^[129]。

4 叶尖定时技术的发展趋势与展望

4.1 传感信号复用

叶片振动和叶尖间隙是航空发动机等重大装备动叶片健康监测最为重要的两种状态参数,直接影响装备的工作效率和运行安全。目前,通常采用不同的测试系统完成叶片振动和叶尖间隙的在线检测,极大增加了发动机上传感器的安装数量,降低了发动机安全裕度。然而,叶端传感信号同时包含了叶尖间隙信息和叶片振动信息,信号脉冲的到达时刻可作为叶片振动位移的计算依据,信号峰峰值可作为叶尖间隙计算的原始数据。基于传感信号复用的功能拓展,可实现单传感器多种功能,即“一传多能”,这种方式可以有效减少发动机机匣开孔的数量,提高航空发动机的安全裕度。此外,利用叶尖间隙数据可以对一些难以通过叶尖定时方法识别的转子故障进行诊断,例如转子不对中、转子不平衡、转静碰摩等故障。未来,集成叶尖定时和叶尖间隙测量功能的传感器和测量系统将成为发展趋势。

4.2 不确定度的分析与校准

叶片振动参数的测量精度对于重大装备设计和发动机测试具有重要的参考价值。针对基于叶尖定时原理的叶片振动参数测量系统进行不确定度分析与校准对于叶片振动非接触在线测量至关重要。然而,目前在叶尖定时测量领域,不确定度评定的研究成果较少,仍不完善。英国 Rolls-Royce 公司专家 RUSSHARD P 评估了一些影响叶尖定时振动测量不确定度的因素,包括传感器布局、信号噪声、信号采集、数据处理等。在现有的叶尖定时测量校准方法中,应变片法是最为成熟的应用方法,但该方法仅在测试叶片振动频率精度方面较为可靠,目前尚未形成针对叶片到达时刻的成熟精度评价和校准方法。未来可以建立更为合理的有限元仿真模型,用于叶尖定时振动测量的不确定度分析与校准。另外,还可设计用于叶片非接触振动测试的机械装置,对叶尖定时振动测量数据进行分析 and 校准。

4.3 系统的机载应用

目前,叶尖定时测量系统主要应用于发动机

地面台架试验,并已成为重大装备叶片振动非接触测试的标配系统。目前,传感器、驱动及调理模块在试验现场运行,而采集模块和上位机则在设备间运行,叶片振动参数的辨识往往在发动机试验后进行离线分析,无法及时发现发动机叶片的异常状态并提供预警。美国 Hood 公司已研发出多型基于叶端传感的叶片状态参数测量系统,并在高转速叶片的状态监测中得到了广泛应用。同时,基于叶端传感的叶片振动参数在线测量方法已被美国列入航空发动机的测试大纲、被英国 Rolls-Royce 公司运用在 UltraFan 发动机机载的在线测量中。国内的天津大学段发阶团队在善测(天津)科技有限公司开展了叶片振动测量产品研发,自主研制了国内首套工程级叶片振动测量系统,该系统在中国航发集团四川燃气涡轮研究院、沈阳发动机研究所、上海商用航空发动机制造有限责任公司等十多家单位的地面台架试验中得到应用,但尚未在机载测试中投入使用。随着智能传感技术的发展,叶片振动信号的感知、调理、采集、处理功能将高度集成,未来叶尖定时测量系统将向着航空发动机机载应用的方向发展,原来的4大组成部分将进一步缩减为传感器和信号处理机载模块2个部分。其中,传感器安装在机匣安装孔内,信号处理机载模块放置在航空发动机的电子仓内,实现叶片振动位移数据的采集及存储。传感器及测量系统向着更小型、更集成、更可靠的方向发展。然而,如何保证叶尖定时系统在航空发动机极端恶劣的环境中稳定、可靠、长时间地运行,将成为未来研究的重点。

4.4 数字孪生及智能运维

目前,重大装备动叶片的振动参数在线监测已通过工程级系统样机在发动机台架上开展测试,实现了多通道叶片振动的非接触测量,但尚无法满足重大装备多级、多部件、多机组旋转叶片智能运维的复杂需求。因此,亟待借助大数据分析技术,研发包括传感及采集层、边缘计算层、应用层、数据可视化层在内的叶片健康状态智能运维分析系统。在重大装备健康监测领域,数字孪生技术通过构建装备虚拟孪生体的方式实时监测前期健康状态,该技术可实现物理实体与虚拟孪

生体之间的实时数据交互,包括从物理实体到孪生体的数据传输(用于更新孪生体的数据)、由孪生体模型计算物理实体的运行状态并进行预测。构建装备数字孪生体的主要目标是精确刻画装备的运行状态,以实现装备健康智能运维。将叶尖定时监测与数字孪生技术结合,有望实现叶片多模态识别及动应力准确反演。一方面,基于叶尖定时信号对叶片模型进行准确更新可以提高孪生模型的可靠性;另一方面,构建数字孪生模型可以为基于叶尖定时的模态识别提供先验知识,提升叶尖定时系统对叶片多模态振动响应识别-解耦的准确性。

5 结论

航空发动机、燃气轮机等重大装备旋转叶片的振动参数是叶片健康状态的重要指标,基于叶尖定时测量技术实时在线监测叶片振动状态能保障重大装备安全、稳定、可靠运行。

本文的主要贡献为:①介绍了叶尖定时测量基本原理、叶片振动测量系统典型架构、叶片振动测量常用流程。②分析并归纳了叶尖定时测量关键技术,从叶片到达时刻的高精度提取、高信噪比的叶片振动位移测量、极度欠采样的叶片振动参数辨识、基于小样本叶尖定时信号的叶片故障诊断4个方面进行了分析探讨。③回顾并详细分析了叶尖定时测量技术在定时传感、振动参数辨识、叶片故障诊断3个方面取得的重大进展。叶尖定时技术正向传感器任意角布局、单传感器测量方向发展,并开始应用于裂纹、碰摩、外物损伤、喘振、颤振等叶片典型故障诊断。④提出了未来需要重点关注的4个研究方向,利用“一传多能”、叶尖定时校准、智能传感、大数据分析等新兴技术,解决传感信号复用、不确定度分析与校准、系统的机载应用、数字孪生及智能运维等方面的技术瓶颈。叶尖定时测量技术的展望对后续的方法研究、产品研发及工程应用具有指导意义。

参考文献

- [1] HEATH S, IMREGUN M. A survey of blade tip-timing measurement techniques for turbomachinery vibration[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, 1998, 120(4): 784-791.
- [2] MADHAVAN S, JAIN R, SUJATHA C, et al. Vibration based damage detection of rotor blades in a gas turbine engine [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 46: 26-39.
- [3] RZADKOWSKI R, GNESIN V, KOLODYAZHNAYA L. Aeroelasticity analysis of unsteady rotor blade forces and displacements in LP last stage steam turbine with various pressure distributions the stage exit[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2018, 6(5): 333-337.
- [4] XIONG H Y, PENG Y H, HU Y Y, et al. Vibration fault signal analysis and diagnosis of flue gas turbine[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 134. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105981.
- [5] HUANG B W, KUANG J H. Variation in the stability of a rotating blade disk with a local crack defect[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(3): 486-502.
- [6] KIM H. Crack evaluation of the fourth stage blade in a low-pressure steam turbine [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(3): 907-913.
- [7] NURBANASARI M, ABDURRACHIM. Crack of a first stage blade in a steam turbine [J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2014, 2(2): 54-60.
- [8] WITEK L. Experimental crack propagation and failure analysis of the first stage compressor blade subjected to vibration [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(7): 2163-2170.
- [9] 430厂. 航空发动机叶片故障分析研究[C]//航空发动机叶片故障及预防研讨会论文集. 北京, 2005: 36-53.
- 430 FACTORY. Analysis and research on aeroengine blade failure [C]// Proceedings of the Symposium on Aeroengine Blade Failure and Prevention. Beijing, 2005: 36-53. (in Chinese)
- [10] 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 Y G. Key technology research on non-contact on-line monitoring for fume turbine blade vibration [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [11] 彭建, 刘兵. 压气机转子叶片动频动应力测试技术和应用研究[C]//中国航空学会第六届发动机试验与测试技术学术交流会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2002: 80-85.
- PENG J, LIU B. Measurement technology and application of dynamic frequency and dynamic stress of compressor ro-

- tor blade[C]// Proceedings of the 6th Academic Exchange Conference on Engine Testing and Testing Technology of the Chinese Society of Aeronautics. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2002: 80-85. (in Chinese)
- [12] DEFERRARI H, DARBY R, ANDREWS F. Vibrational displacement and mode-shape measurement by a laser interferometer[J]. the Journal of the Acoustical Society of America, 1967, 42(5): 982-990.
- [13] 王向红. 混流式水轮机叶片裂纹声发射监测的若干关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- WANG X H. Several key problem researches on monitoring cracks of hydraulic turbine blades based on acoustic emission technique [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [14] 葛永庆, 刘江, 安连锁. 汽轮机叶片振动非接触测量技术综述[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(3): 54-58.
- GE Y Q, LIU J, AN L S. Overview of non contact measurement technology for turbine blade vibration[J] Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(3): 54-58. (in Chinese)
- [15] MATHIOUDAKIS K, LOUKIS E, PAPAILIOU K D. Casing vibration and gas turbine operating conditions [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1990, 12(4): 478-485.
- [16] 萨勃洛斯基. 涡轮机叶片振动的非接触测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- SABLOSKI. Non contact measurement of turbine blade vibration [M] Beijing: National Defense Industry Press, 1986. (in Chinese)
- [17] RUSSHARD P. Development of a blade tip timing based engine health monitoring system [D]. Manchester, UK: The University of Manchester, 2010.
- [18] CHEN Z, SHENG H, XIA Y, et al. A comprehensive review on blade tip timing-based health monitoring: status and future [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149 (2). DOI: 10.1016/j.ymssp. 2020. 107330.
- [19] 新华网. 聚焦实现重大技术装备的高端化、智能化、绿色化发展[EB/OL]. [2023-04-10]. http://www.news.cn/2023-03/01/c_1129406735.html.
- XINHUA. Focus on realizing high-end, intelligent and green development of major technical equipment [EB/OL]. [2023-04-10]. http://www.news.cn/2023-03/01/c_1129406735.html. (in Chinese)
- [20] 杨光海. 汽轮机叶片的安全防护[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- YANG H G. Safety protection of turbine blades[M]. Beijing: China Machine Press, 1992. (in Chinese)
- [21] 欧阳涛. 基于叶尖定时的旋转叶片振动检测及参数辨识技术[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- OU-YANG T, Rotating blade vibration detection and parameters identification technique using blade tip-timing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [22] 李世林. CFM56-7B 发动机叶片振动模态分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(4): 13-15.
- LI S L. Vibration modal analysis of CFM56-7B engine blade [J] Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2011, 22(4): 13-15. (in Chinese)
- [23] 沈庆楼, 刘湘一, 贾忠湖, 等. 发动机叶片振动特性分析[J]. 海军筑空工程学院学报, 2005, 20(4): 473-476.
- SHEN Q L, LIU X Y, JIA Z H, et al. Analysis of vibration characteristics of engine blades [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2005, 20(4): 473-476. (in Chinese)
- [24] CUMPSTY N A, GREITZER E M. Ideas and methods of turbomachinery aerodynamics: a historical view[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(1): 15-26.
- [25] 贺长波. 离心式压缩机叶片状态在线监测与故障预警方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- HE C B. Research on online monitoring and fault early warning method of centrifugal compressor blade [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [26] 张娅, 陈康, 王维民, 等. 叶片裂纹故障早期监测预警方法研究[J]. 风机技术, 2017, 59: 45-50, 73.
- ZHANG Y, CHEN K, WANG W M, et al. Early monitoring and warning method for crack faults in blades [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2017, 59: 45-50, 73. (in Chinese)
- [27] NAUNG S W, RAHMATI M, FAROKHI H. Direct numerical simulation of interaction between transient flow and blade structure in a modern low-pressure turbine[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 192. DOI: 10.1016/j.ijmecsci. 2020. 106104.
- [28] 周凯, 乔百杰, 刘美茹, 等. 基于参考键相动态追踪的无转速叶尖定时测量方法[J]. 推进技术, 2024, 45

- (8): 226-235.
- ZHOU K, QIAO B J, LIU M R, et al. Blade tip timing measurement method without once-per-revolution sensor based on dynamic tracking of reference key phase [J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45 (8): 226-235.
- [29] 刘志博. 基于叶尖定时信号的叶片振动参数辨识方法与技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- LIU Z B. Identification method and technology research of blade vibration parameters based on tip timing signals [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
- [30] RUSSHARD P. Derived once per rev signal generation for blade tip timing systems [C]// 60th International Instrumentation Symposium 2014. London: Rolls-Royce Plc., 2014: 95-99.
- [31] GUO H T, DUAN F J, ZHANG J L. Blade resonance parameter identification based on tip-timing method without the once-per revolution sensor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66: 625-639.
- [32] WANG Z, YANG Z, WU S, et al. An OPR-free blade tip timing method based on blade spacing change [C]// 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE, 2020: 1-5.
- [33] 支烽耀. 基于叶尖定时叶片振动测量的故障诊断方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- ZHI F Y. Research on fault diagnosis method based on blade vibration measurement using blade tip timing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2023. (in Chinese)
- [34] GOTTSCHALK B. Timing discriminator using leading-edge extrapolation [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1981, 190(1): 67-70.
- [35] ZHOU G, HUANG W, ZHOU X, et al. Improvement on timing accuracy of LiDAR for remote sensing [C]// International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Guangxi, China: 2018: 2495-2498.
- [36] 陈瑞强, 江月松, 裴朝. 基于双阈值前沿时刻鉴别法的高频脉冲激光测距系统 [J]. 光学学报, 2013, 33(9): 147-154.
- CHEN R Q, JIANG Y S, PEI Z. High frequency pulse laser ranging system based on double threshold leading edge time discrimination method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 147-154. (in Chinese)
- [37] 杨凯强. 窄脉冲激光探测与测距技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- YANG K Q. The Research of narrow pulse laser detection and range finder [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014. (in Chinese)
- [38] 周聪, 段发阶, 刘志博, 等. 基于形心法的叶尖到达时刻高精度提取方法研究 [J]. 传感技术学报, 2022, 35(7): 952-959.
- ZHOU C, DUAN F J, LIU Z B, et al. Research on high-precision extraction method of blade tip arrival time based on centroid algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(7): 952-959. (in Chinese)
- [39] 刘昊, 段发阶, 李杰, 等. 基于空域变换的叶尖定时信号预处理方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 218-229.
- LIU H, DUAN F J, LI J, et al. Preprocessing method of blade tip timing signal based on spatial transformation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 218-229. (in Chinese)
- [40] RUSSHARD P. Development of a blade tip timing based engine health monitoring system [D]. Manchester: The University of Manchester, 2010.
- [41] 邵兴臣, 段发阶, 蒋佳佳, 等. 基于自适应滑动均值和小波阈值的叶尖间隙信号降噪方法 [J]. 传感技术学报, 2021, 34(1): 34-40.
- SHAO X C, DUAN F J, JIANG J J, et al. Denoising method of blade tip clearance signal based on adaptive moving average and wavelet threshold [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(1): 34-40. (in Chinese)
- [42] 刘志博, 段发阶, 叶德超, 等. 叶尖定时信号趋势项自适应拟合 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(22): 2749-2756, 2764.
- LIU Z B, DUAN F J, YE D C, et al. Adaptive fitting of blade tip timing signal's trend terms [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(22): 2749-2756, 2764. (in Chinese)
- [43] RUSSHARD P, BACK D. Method for analysing vibration in rotor blades: EP2136189B1 [P]. 2009-12-23.
- [44] YE D C, DUAN F J, JIANG J J, et al. Identification of vibration events in rotating blades using a fiber optical tip timing sensor [J]. Sensors, 2019, 19(7). DOI: 10.3390/s19071482.
- [45] 郭沛铨, 牛广越, 傅骁, 等. 无转速同步下叶片同步振动参数辨识误差修正 [J]. 传感技术学报, 2024, 37

- (6): 1005–1013.
- GUO P X, NIU G Y, FU X, et al. Error revising of blade synchronous vibration parameters identification based on blade tip timing without once-per revolution sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(6): 1005–1013. (in Chinese)
- [46] ZABLOTSKIY I Y, KOROSTELEV Y A. Measurement of resonance vibrations of turbine blades with the ELURA device [R]. Foreign Technology Division Wright-Patterson AFB OH, 1978.
- [47] 郑芳芳, 牛广越, 易亮, 等. 基于USB 3.0的多通道叶尖间隙数据采集系统设计[J]. 传感技术学报, 2023, 36(6): 874–880.
- ZHEN F F, NIU G Y, YI L, et al. Design of multi-channel blade tip clearance data acquisition system based on USB 3.0 [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(6): 874–880. (in Chinese)
- [48] 王维民, 陈子文, 张旭龙, 等. 基于叶端定时的转子碰摩故障诊断方法[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 30–39.
- WANG W M, CHEN Z W, ZHANG X L, et al. Fault diagnosis method of rotor rub impact based on blade tip timing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(8): 30–39. (in Chinese)
- [49] HYVÄRINEN A, OJA E. Independent component analysis: algorithms and applications [J]. Neural Networks, 2000, 13(4): 411–430.
- [50] YU H, YANG J. A direct LDA algorithm for high-dimensional data — with application to face recognition [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(10): 2067–2070.
- [51] ROWEIS S T, SAUL L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding [J]. Science, 2000, 290(5500): 2323–2326.
- [52] KIRA K, RENDELL L A. The feature selection problem: traditional methods and a new algorithm [C]// Proceedings of the Tenth National Conference on Artificial Intelligence. San Jose, US, 1992: 129–134.
- [53] LIU H, SETUONO R. Feature selection and classification — a probabilistic wrapper approach [M]. Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems. Boca Raton, US: CRC Press, 1996: 419–424.
- [54] LEHMANN P H, GARCIA I, OSTEN W, et al. Turbine-blade tip clearance and tip timing measurements using an optical fiber bundle sensor [C]// Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII Part Two. SPIE, 2013.
- [55] YE D C, DUAN F J, JIANG J J, et al. Synchronous vibration measurements for shrouded blades based on fiber optical sensors with lenses in a steam turbine [J]. Sensors, 2019, 19(11). DOI: 10.3390/s19112501.
- [56] GARCÍA I, BELOKI J, ZUBIA J, et al. An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig [J]. Sensors, 2013, 13(6): 7385–7398.
- [57] GUO H T, DUAN F J, CHENG Z H. Numerical analysis of the blade tip-timing signal of a fiber bundle sensor probe [J]. Optical Engineering, 2015, 54(3). DOI: 10.1117/1.OE.54.3.034103.
- [58] LAWSON C P, IVEY P C. Tubomachinery blade vibration amplitude measurement through tip timing with capacitance tip clearance probes [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 118(1): 14–24.
- [59] DUAN F J, LI M L, OU-YANG T, et al. Analysis of the tip-timing precision of double-shielded capacitive pulse sensor [C]// 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Zhangjiajie, China: IEEE, 2009: 81–84.
- [60] TOMASSINI R, ROSSI G, BROUCKAERT J F. On the development of a magnetoresistive sensor for blade tip timing and blade tip clearance measurement systems [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(10). DOI: 10.1063/1.4964858.
- [61] JAMIA N, FRISWELL M I, EL-BORGI S, et al. Modeling and experimental validation of active and passive eddy current sensors for blade tip timing [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 98–110.
- [62] YE D C, DUAN F J, ZHOU Q, et al. Vibrations measurements for shrouded blades of steam turbines based on eddy current sensors with high frequency response [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2019, 10(4). DOI: 10.3969/j.issn.1674-8042.2019.04.002.
- [63] ZHANG J W, DING K Q, CHEN G, et al. High-precision extraction method for blade tip-timing signal with eddy current sensor [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2020(1). DOI: 10.1155/2020/8882858.
- [64] VIOLETTI M, XU Q, HOCHREUTINER O, et al. New microwave sensor for on-line blade tip timing in gas and steam turbines [C]// 2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings. IEEE, 2012: 1055–1057.

- [65] ZHANG J L, DUAN F J, NIU G Y, et al. A blade tip timing method based on a microwave sensor[J]. *Sensors*, 2017, 17(5). DOI: 10.3390/s17051097.
- [66] DHADWAL H S, MEHMUD A, KHAN R, et al. Integrated fiber optic light probe: measurement of static deflections in rotating turbomachinery[J]. *Review of scientific instruments*, 1996, 67(2): 546–552.
- [67] TECHNOLOGY H. Sensors blade vibration monitoring [EB/OL]. [2023-04-10]. <https://hoodtechbvm.com/sa-mple-page/>.
- [68] ENGINEERING A. Measurement systems[EB/OL]. [2023-04-10]. <https://agilisemeasurementsystems.com>.
- [69] 善测(天津)科技有限公司. 叶片振动测量系统[EB/OL]. [2023-04-10]. <https://www.smartmens.com/ypz-dclxt>.
- SMARTMENS. Blade vibration measurement system[EB/OL]. [2023-04-10]. <https://www.smartmens.com/ypz-dclxt>. (in Chinese)
- [70] 李志华. 测振用叶尖定时传感器的设计[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- LI Z H. Design of the tip-timing sensor for the blade vibration measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [71] BARRANGER J P. Low-cost FM oscillator for capacitance type of blade tip clearance measurement system [R]. NASA Technical Paper, 1987.
- [72] BARRANGER J P. An in-place recalibration technique to extend the temperature capability of capacitance-sensing, rotor-blade-tip-clearance measurement systems[R]. SAE Technical Paper, 1978.
- [73] NAUNG S W, RAHMATI M, FAROKHI H. Direct numerical simulation of interaction between transient flow and blade structure in a modern low-pressure turbine[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 192. DOI: 10.1016/j.ijmecsci. 2020. 106104.
- [74] 段发阶, 牛广越, 周琦, 等. 航空发动机叶尖间隙在线测量技术研究综述[J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 74–100.
- DUAN F J, NIU G Y, ZHOU Q, et al. A review of online blade tip clearance measurement technologies for aeroengines[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 74–100. (in Chinese)
- [75] RICKMAN J. Eddy current turbocharger blade speed detection[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1982, 18(5): 1014–1021.
- [76] QINETIQ. Sensing [EB/OL]. [2023-04-10]. <https://www.qinetiq.com/en/capabilities/ai-analytics-and-advanced-computing/non-destructive-testing>.
- [77] MONITRAN. Eddy current probes and drivers[EB/OL]. [2023-04-10]. <https://www.monitran.com/products/eddy-current-probes-and-drivers>.
- [78] 王维民, 尚文, 姚剑飞, 等. 基于电涡流技术的叶尖间隙及定时测量研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41: 102–107.
- WANG W M, SHANG W, YAO J F, et al. A blade tip-timing measurement study based on eddy current technology[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 41: 102–107. (in Chinese)
- [79] WAGNER M, SCHULZE A, VOSSICK M, et al. Novel microwave vibration monitoring system for industrial power generating turbines[C]// *Proceedings of the MTT-S International Microwave Symposium*, Baltimore, US: IEEE, 1998: 1211–1214.
- [80] MEGGITT. Sensors [EB/OL]. [2023-04-10]. <https://www.meggitt.com/products-services/engine-health-and-vibration-monitoring>.
- [81] NIU G Y, DUAN F J, LIU Z B, et al. A high-accuracy non-contact online measurement method of the rotor-stator axial gap based on the microwave heterodyne structure [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 150. DOI: 10.1016/j.ymssp. 2020. 107320.
- [82] NIU G Y, DUAN F J, LIU F Y, et al. Identification of the excitation source's circumferential position for rotating blades based on vibration phase[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 520. DOI: 10.1016/j.jsv. 2021. 116628.
- [83] HEATH S, IMREGUN M. Improved single-parameter tip-timing method for turbomachinery blade vibration measurements using optical laser probes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1996, 38(10): 1047–1058.
- [84] HEATH S. A new technique for identifying synchronous resonances using tip-timing[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power - Transactions of the ASME*, 2000, 122(2): 219–225.
- [85] RIGOSI G, BATTIATO G, BERRUTI T M. Synchronous vibration parameters identification by tip timing measurements[J]. *Mechanics Research Communications*, 2017,

- 79: 7-14.
- [86] ZHANG L, YUAN H Q, LI X, et al. Synchronous vibration parameters identification of variable rotating speed blades based on new improved two-parameter method without OPR sensor[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(14): 1-13.
- [87] NIKPOUR M, MORADI S, SOODMAND I. A new bladed assembly simulator and an improved two-parameter plot method for blade tip - timing numerical simulations [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2021, 235(14): 2135-2144.
- [88] JOUNG K K, PAENG K S, CHOI H J, et al. Analysis of vibration of the turbine blades using non-intrusive stress measurement system [C]// Proceedings of the ASME Power, Atlanta, GA, United states: American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [89] LIU Z B, DUAN F J, NIU G Y, et al. An improved Circumferential Fourier Fit (CFF) method for blade tip timing measurements [J]. Applied Sciences, 2020, 10(11). DOI: 10.3390/app10113675.
- [90] 欧阳涛, 郭文力, 段发阶, 等. 基于叶尖定时的旋转叶片同步振动辨识新方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 249-252, 257.
- OUYANG T, GUO W L, DUAN F J, et al. New method for identifying rotating blades synchronous vibration based on tip-timing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 249-252, 257. (in Chinese)
- [91] GALLEGO G J, DIMITRIADIS G, WRIGHT J R. A class of methods for the analysis of blade tip timing data from bladed assemblies undergoing simultaneous resonances — part I: theoretical development [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2007: 22-32.
- [92] GALLEGO-G J, DIMITRIADIS G, CARRINGTON I B, et al. A class of methods for the analysis of blade tip timing data from bladed assemblies undergoing simultaneous resonances — part II: experimental validation [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2007: 138-147.
- [93] 欧阳涛, 段发阶, 李孟麟, 等. 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.
- OU-YANG T, DUAN F J, LI M L, et al. Method for identifying rotating blade synchronous vibration at constant speed [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 742-746. (in Chinese)
- [94] WANG Z K, YANG Z B, WU S M, et al. An OPR-free blade tip timing method for rotating blade condition monitoring [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70. DOI: 10.1109/TIM. 2020. 3033732.
- [95] CHEN K, WANG W M, ZHANG X L, et al. New step to improve the accuracy of blade tip timing method without once per revolution [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 134. DOI: 10.1016/j. ymssp. 2019. 106321.
- [96] CAO J H, YANG Z B, LI H Q, et al. Single-probe blade tip timing: a novel method for anomaly identification based on frequency shift [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70. DOI: 10.1109/TIM. 2021. 3112794.
- [97] CAO J H, YANG Z B, LI H Q, et al. Rotating blade frequency identification by single-probe blade tip timing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 172. DOI: 10.1016/j. ymssp. 2022. 108961.
- [98] SABBATINI D, PEETERS B, MARTENS T, et al. Data acquisition and processing for tip timing and operational modal analysis of turbomachinery blades [C]// AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2012, 1457(1): 52-60.
- [99] VERCOUTTER A, LARDIES J, BERTHILLIER M, et al. Improvement of compressor blade vibrations spectral analysis from tip timing data: aliasing reduction [C]// ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [100] KHARYTON V, BLADH R. Using tip-timing and strain gauge data for the estimation of consumed life in a compressor blisk subjected to stall - induced loading [C]// ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, 2014.
- [101] ZIELINSKI M, ZILLER G. Noncontact vibration measurements on compressor rotor blades [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(7): 847-856.
- [102] 王宇华. 高速旋转叶片振动叶端定时测量方法和系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- WANG Y H. Research of measuring method and system using tip - timing for high - speed rotating blade vibration [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)

- [103]方志强. 叶尖定时传感器及叶片振动信号处理技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- FANG Z Q. Research on tip-timing sensor & processing technique for vibration signal of blade[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- [104]李孟麟, 段发阶, 欧阳涛, 等. 基于叶尖定时的旋转机械叶片振动频率辨识 ESPRIT 方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 18-21.
- LI M L, DUAN F J, OU-YANG T, et al. ESPRIT method for vibration frequency identification of rotating machinery blades based on tip timing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(12): 18-21. (in Chinese)
- [105]WANG Z K, YANG Z B, WU S M, et al. An improved multiple signal classification for nonuniform sampling in blade tip timing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10): 7941-7952.
- [106]LIU Z B, DUAN F J, NIU G Y, et al. Reconstruction of blade tip-timing signals based on the MUSIC algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 163. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108137.
- [107]SALHI B, LARDIÈS J, BERTHILLIER M, et al. Modal parameter identification of mistuned bladed disks using tip timing data[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 314(3): 885-906.
- [108]LI M, DUAN F, OU-YANG T. Reconstruction of the blade vibration signal from rotating machinery based on blade tip-timing measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 98-103.
- [109]LIN J, HU Z, CHEN Z S, et al. Sparse reconstruction of blade tip-timing signals for multi-mode blade vibration monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 81: 250-258.
- [110]SPADA R P, NICOLETTI R. Applying compressed sensing to blade tip timing data: a parametric analysis[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics - IFTOMM. Rio de Janeiro, Springer International Publishing, 2019: 121-134.
- [111]WANG Z K, YANG Z B, LI H Q, et al. Robust sparse representation model for blade tip timing[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 500. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116028.
- [112]ZIELINSKI, MICHAEL, GERHARD ZILLER. Noncontact blade vibration measurement system for aero engine application[C]// In 17th International Symposium on Air-breathing Engines, 2005.
- [113]GYEKENYESI A L, SAWICKI J T, BAAKLINI G. Application of vibration monitoring techniques for damage detection in rotating disks [C]// The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Honolulu, Hawaii, 2002.
- [114]CHUNG J P, YOO H H. Blade fault diagnosis using Mahalanobis distance[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(4): 1377-1385.
- [115]徐海龙. 旋转叶片裂纹的叶端定时非接触在线检测关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- XU H L, Research on key technology of crack detection in rotating blades by non-contact on-line blade tip-timing method[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [116]DU TOIT R G, DIAMOND D H, HEYNS P S. A stochastic hybrid blade tip timing approach for the identification and classification of turbomachine blade damage[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 389-411.
- [117]WU S M, WANG Z K, LI H Q, et al. Blade crack detection using blade tip timing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70. DOI: 10.1109/TIM.2020.3046926.
- [118]WU S M, WANG Z K, LI H Q, et al. A hybrid fault diagnosis approach for blade crack detection using blade tip timing[C]// IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2020.
- [119]XU J H, QIAO B J, LIU M, et al. Crack propagation monitoring of rotor blades using synchroextracting transform[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 509. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116253.
- [120]CHEN Z, YANG Y, XIE Y, et al. Non-contact crack detection of high-speed blades based on principal component analysis and Euclidian angles using optical-fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 66-72.
- [121]RAJENDRAN P, JAMIA N, EL-BORGI S, et al. Wavelet transform-based damage identification in bladed disks and rotating blades[J]. Shock and Vibration, 2018(10). DOI: 10.1155/2018/3027980.
- [122]宋慧斌. 叶片振动及碰摩响应研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.

- SONG H B. Response study of blade vibration and tip rubbing [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)
- [123] 吴淑明, 陈雪峰, 杨志勃. 转子叶片碰磨故障诊断的叶端定时方法 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 (20): 24-33.
- WU S M, CHEN X F, YANG Z B. Rotor blade rubbing fault diagnosis using blade tip timing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65 (20): 24-33. (in Chinese)
- [124] CHANA K S, CARDWELL D N. The use of eddy current sensor based blade tip timing for FOD detection [C]// Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Berlin, Germany: ASME, 2008: 169-178.
- [125] 李涵. 高转速叶片外物打击损伤模拟及监测方法研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- LI H. Study on the simulating and monitoring method of high speed blade external object strike damage [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022. (in Chinese)
- [126] ZHAO X W, ZHOU Q, YANG S H, et al. Rotating stall induced non-synchronous blade vibration analysis for an unshrouded industrial centrifugal compressor [J]. Sensors, 2019, 19(22). DOI: 10.3390/s19224995.
- [127] PRZYSOWA R, RUSSHARD P, WACHLACZENKO M. Using Blade tip timing and pressure data to characterise compressor stall and surge [C]// ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020.
- [128] GEORGIEV V, HOLIK M, KRAUS V, et al. The blade flutter measurement based on the blade tip timing method [C]// Proceedings of the 15th WSEAS International Conference on Systems, Corfu Island, Greece: World Scientific and Engineering Academy and Society, 2011: 270-275.
- [129] RUSSHARD P. The rise and fall of the rotor blade strain-gauge [C]// Vibration Engineering and Technology of Machinery: Proceedings of VETOMAC X, 2014: 22-37.

(本文编辑: 刘宇轩, 孟薇)



第一作者: 段发阶(1968—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为在线测量与设备健康监测技术、光电测量及计算机视觉检测技术、海洋环境监测与水声探测技术。



通信作者: 牛广越(1992—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为大型旋转机械动叶片振动参数、叶尖间隙参数、转静子轴向间隙参数非接触在线测量及信号处理。