

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416396

涡轮带冠叶片多通道叶尖间隙测试技术研究^{*}易亮¹ 薛志飞¹ 牛广越² 李发富² 段发阶²

(1. 中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司 上海 201306;

2. 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: 带冠叶片因具有增加叶片刚度、减小二次损失等作用而被广泛应用于航空发动机等重大旋转装备,其叶尖间隙参数的多通道高精度在线监测是确保发动机运转时安全和效率的重要一环。为了实现这一目的,同时抑制带冠叶片轴向位移对间隙测量的不利影响,设计了一种一字型芯极电容传感器,并在改装篦齿的基础上以平行平板电容原理建立了叶尖间隙测量模型。搭建了利用一字型芯极传感器的12通道间隙测量系统,并在模拟篦齿盘上开展了3 mm测量范围内的标定和 ± 1 mm轴向位移下的精度测试实验,结果显示开发的间隙测量系统测量精度优于 $45.4 \mu\text{m}$ 。最后完成了真实发动机带冠叶片三级共12测点的叶尖间隙同步测量台架试验,结果表明提出的12通道间隙测量系统具备高可靠性和重复性,满足带冠叶片叶尖间隙测量需要。

关键词: 涡轮带冠叶片;叶尖间隙;多通道;台架试验

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on multi-channel blade tip clearance testing technology for turbine blades with shrouds

Yi Liang¹ Xue Zhifei¹ Niu Guangyue² Li Fafu² Duan Fajie²

(1. Aero Engine Corporation of China Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201306, China;

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

Abstract: The shrouded blades are widely utilized in significant rotating equipment such as aircraft engines due to their functions of enhancing blade stiffness and reducing secondary losses. And the multi-channel high-precision online monitoring of blade tip clearance parameters is a crucial aspect in ensuring the safety and efficiency of engine operation during its runtime. To achieve this goal and inhibit the adverse effects of the axial displacement, a novel "I-shaped" core-pole capacitance sensor is designed in this paper. Based on the modified labyrinth teeth, a tip clearance measurement model is established using the parallel-plate capacitor principle. A 12-channel blade tip clearance measurement system based on I-shaped core-pole sensor was developed. Calibration within a 3 mm measurement range was conducted on a simulated labyrinth disc, and precision testing was performed under ± 1 mm axial displacement. The results indicate that the measurement accuracy of the aforementioned blade tip clearance measurement system exceeds $45.4 \mu\text{m}$. The final stage involved the synchronization testing platform for blade tip clearance of actual engine blades with shrouds, encompassing twelve measurement points across three levels. Results demonstrate that the proposed 12-channel blade tip clearance measurement system exhibits high reliability and repeatability, and meets the needs of tip clearance measurement of shrouded blades.

Keywords: turbine blades with shrouds; blade tip clearance; multi-channel; test bench experiment

0 引言

叶尖间隙是关乎叶片、发动机乃至整个机体性能和安

全的重要运转参数^[1-3]。过大或过小的叶尖间隙会给发动机的效率或安全带来巨大的影响^[4-6],因此叶尖间隙参数的在线监测显得尤为关键,如何实现真实机载环境下的叶尖

收稿日期:2024-07-08

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52205573, U2241265, 92360306)、中国博士后科学基金(2022M720106)、天津大学科技创新领军人才培养“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(J2022-V-0005-0031)、航空科学基金(2022Z060048001)、青年人才托举工程(2021QNRC001)项目资助

间隙在线高精度测量一直是该领域的研究热点^[7-9]。

从上世纪五六十年代至今,国内外相关学者和机构相继提出并发展了包括放电探针法、光纤法、电涡流法、微波法、电容法等^[10]在内的多种叶尖间隙测量方法。其中,放电探针法由于采用火花放电原理仅能实现叶片最小叶尖间隙测量,光纤法难以克服发动机高温、油污等极端环境的干扰,电涡流法对待测叶片的导电性、几何结构等有较高要求,微波法存在空间滤波效应^[9]。而电容法由于其耐高温、宽带宽、高灵敏度、结构简单且易于安装等优势成为了最受关注和青睐的叶尖间隙测量技术^[11],相关的研究最为成熟。航空发动机、烟气轮机、燃气轮机等重大装备部件的叶尖间隙台架试验大都采用的是电容式产品。

类似自由叶片叶尖间隙的定义,带冠叶片叶尖间隙指的是叶冠上篦齿端面与机匣壁之间的径向距离,现有传感器对待测篦齿标定后基本可以实现带冠叶片叶尖间隙测量,但篦齿厚度薄、周向连续的结构特点使得传感器对位置测点极其敏感,任何周向载荷导致的带冠叶片以及篦齿发生的轴向位移,即叶尖间隙测量位置偏离标定位置,都会带来测量误差甚至错误。针对轴向位移引起测点变化的问题,Jousselin 等^[12]使用在制造验证过程的最后阶段记录的叶片信息和在每个特征突起记录的到达时间数据点来提取轴向位移。Hatcher 等^[13]在叶尖检测的同时使用图像捕捉装置捕捉叶尖,然后使用图像处理或手动观察来找到测量位置。Mohamed 等^[14]提出一种新的方法来识别探头相对于叶尖传感位置,该方法的工作原理是当转速从零到一定值变化时,通过测量多个转数的叶尖位移来提取稳态轴向位移偏移量。Wang 等^[15]提出并研究了通过控制转子轴向位移来调节叶尖间隙的原理和方法,基本原理是叶尖间隙受转子轴向位移的影响,可以通过控制作用在推力轴承上的可控油压来调整转子轴向位置从而实现叶尖间隙的调节。Zhang 等^[16]利用叶尖定时技术,结合叶尖轮廓方程和初始测量点位置确定了叶片包括轴向位移在内的叶尖五维运动。李发富等^[17]研制了一种“人”字形电容传感器,提出了一种基于频谱的叶尖间隙参数和轴向位移参数同时提取方法,并在实验室环境下验证了所提方法的有效性。然而,这些方法要不就是需要使用额外的设备增加了成本且无法直接解决叶尖间隙测量精度下降问题,要不就是仅在实验室环境得到验证,现场条件下性能和可靠性无法确定。

为了克服轴向位移对叶尖间隙测量的不利影响,同时满足真实发动机多级带冠叶片叶尖间隙同时测量的需求,本文以电容法为基础开展带冠叶片叶尖间隙在线测量研究,设计了一种一字型芯极电容传感器,构建了一字型传感器测篦齿叶尖间隙的测量模型,通过实验室环境下的标定和精度测试实验验证了一字型芯极电容式多通道间隙测量系统抗轴向位移能力,最后利用该系统对某真实航空发动机的多级带冠叶片进行了叶尖间隙地面台架实验,结果显示,设计的多通道一字型芯极电容式叶尖间隙测量系统具

备实际工程意义。

1 测量模型

1.1 被测篦齿改装

传统针对自由叶片的电容式叶尖间隙测量系统基于平板电容工作原理,如图 1(a)所示,一字型传感器测头安装于发动机机匣上,当转子旋转时,传感器芯极与待测叶片端面、叶根(可看看待测平板位于无穷远)之间的电容差随着叶尖间隙值的变化而变化,通过该容值差信号调理放大得到电压峰峰值信号即可实现叶尖间隙测量。而带冠叶片叶尖间隙待测面为周向连续分布的叶顶篦齿端面,即不存在类似自由叶片叶根这样的无穷远被测面,测量原理及结果如图 1(b)所示,篦齿轴向厚度的周期性变化导致输出的电压波形类似正弦信号,输出信号峰峰值和篦齿轴向厚度变化量相关,篦齿轴向厚度变化不大时,输出信号峰峰值极易受噪声干扰,因此,需要对待测篦齿进行改装,在篦齿上人为制造“自由叶片”以提高输出电压信号信噪比,保证带冠叶片叶尖间隙测量精度。最终改装结果为整圈篦齿对称的 4 个位置形成互为 90°的类“自由叶片”。

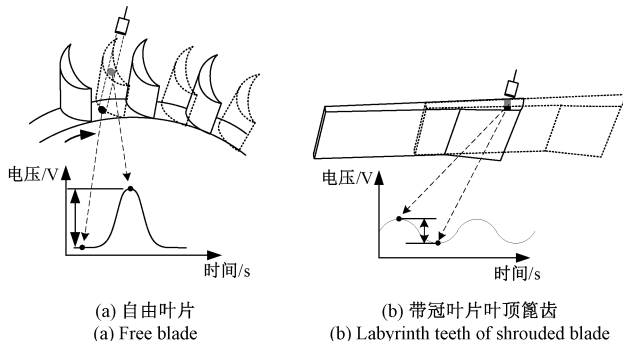


图 1 电容法测叶尖间隙原理及输出结果

Fig. 1 Blade tip clearance's principle and output results measured by capacitance method

1.2 改装篦齿叶尖间隙测量模型

一字型电容传感器测篦齿叶尖间隙的模型如图 2 所示,根据双极板电容公式($C = \epsilon S/d$),经过测量系统调理放大后的输出信号峰峰值 V_{pp} 可表示为:

$$V_{pp} = \frac{k}{\epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{\omega l_2}{d} - \frac{\omega l_1}{d+h} \right)} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 是真空介电常数, ϵ_r 是探头端面和被测篦齿间的相对介电常数, k 是测量系统总的放大倍数, ω 是一字型电容传感器芯极宽度, l_2 是篦齿厚处的厚度, l_1 是篦齿薄处的厚度, d 是叶尖间隙, h 是篦齿改装径向缩减尺寸, l_3 是一字型电容传感器芯极长度, R 是一字型电容传感器半径。实际篦齿 $l_2 = 2l_1$,因此上式可简化为:

$$d + \frac{h}{d/2h + 1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \omega l_1}{k} V_{pp} - h \quad (2)$$

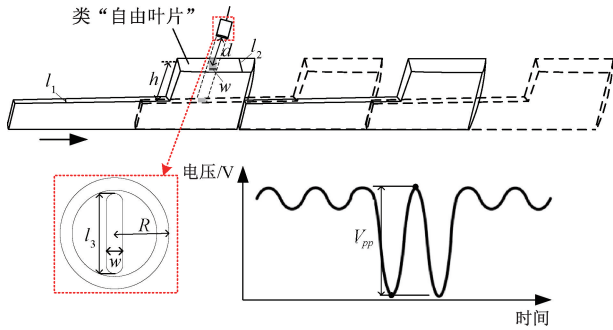


图2 测量模型

Fig. 2 Measurement model

对左边第2项进行泰勒展开保留前6项得:

$$\frac{d}{2} + \frac{d^2}{4h} - \frac{d^3}{8h^2} + \frac{d^4}{16h^3} - \frac{d^5}{32h^4} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \tau \omega l_1}{k} V_{pp} - 2h \quad (3)$$

即叶尖间隙 d 与 V_{pp} 的关系可用多项式描述, 标定表达式可表示为:

$$d = \sum_{i=0}^N \alpha_i (V_{pp})^i \quad (4)$$

式中: α_i 是传感器标定系数, N 是标定曲线多项式阶数, 由式(3)可取 $N=5$ ^[18]。

实际采集信号存在从传感器到采集系统耦合的噪声, 会引起输出的波动, 因此真实采集信号先是通过窗长为15的滑动滤波滤除了输出信号的毛刺, 接着通过对信号波形进行高斯拟合确保了寻峰求取 V_{pp} 的准确性和可靠性, 大大降低了噪声对峰峰值 V_{pp} 的影响, 从而保证了利用式(4)求间隙 d 的精度。

2 标定

在利用式(4)进行篦齿叶尖间隙测量时, 需要先标定得到一字型电容传感器对篦齿的标定系数, 本文所用一字型电容传感器参数为 $\omega=1.5 \text{ mm}$, $l_3=7.4 \text{ mm}$, $R=10 \text{ mm}$ 。实际的发动机环境下不能也不允许进行标定实验, 因此, 参考某待测试的实际低压涡轮篦齿结构和尺寸, 设计了模拟篦齿盘试验件, 搭建了实验室环境下的篦齿叶尖间隙实验系统平台, 开展了标定和不同轴向位移下的叶尖间隙测试实验。

2.1 标定实验

搭建的实验系统平台如图3所示, 相关信息如表1所示。电机带动篦齿盘旋转, 控制器控制转速和转向。一字型电容传感器安装在二维位移台上, 随位移台完成径向和轴向进给, 进给量由数显千分尺测量, 其移动精度达 $1 \mu\text{m}$, 且移动行程优于 10 mm , 可作为叶尖间隙和轴向位移的基准值。对比验证使用的激光三角测距仪, 测距精度 $1.2 \mu\text{m}$, 测量范围 6 mm , 安装距离 20 mm 。

标定前, 先通过位移台轴向数显千分尺调节一字型传感器芯极与篦齿处于零轴向位移位置, 再通过径向数显千

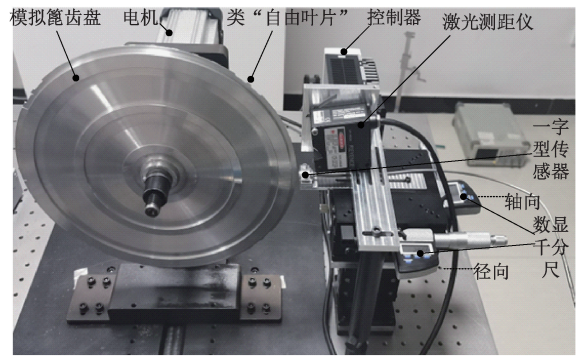


图3 实验系统平台

Fig. 3 Experimental system platform

表1 实验系统平台详细参数

Table 1 Detailed parameters of experimental system platform

部件	厂家型号	关键参数	值
模拟篦齿盘	自制	半径	150 mm
		l_1	0.8 mm
		l_2	1.6 mm
		h	1.5 mm
		ω	1.5 mm
一字型传感器	自制	l_3	7.4 mm
		R	10 mm
		电机	鼎拓 DT8OBLF180-3160
控制器	鼎拓 HPBL1500	功率	1.5 kW
激光三角测距仪	基园士 LK-H025	量程	0~6 mm
		精度	$1.2 \mu\text{m}$
数显千分尺	三丰 350-281-30	量程	25 mm
		精度	$1 \mu\text{m}$

分尺将篦齿与传感器芯极调至相切并将其设为零叶尖间隙位置。接着, 通过位移台径向数显千分尺实现间隙进给(间隙 $0.4 \sim 3.4 \text{ mm}$, 步长 0.2 mm), 最后上位机软件自动采集篦齿上的类自由叶片“扫过时的调理电压信号并将电压信号峰峰值作为对应叶尖间隙值的标定电压值。按式(4)可得标定系数如表2所示, 标定曲线如图4(a)所示。图4(b)显示标定曲线的残差基本均匀分布在 $\pm 15 \mu\text{m}$ 内, 说明标定曲线和标定系数的选择是合适的。

表2 标定系数(保留3位有效数字)

Table 2 Calibration coefficients (three significant digits retained)

系数	α_5	α_4	α_3	α_2	α_1	α_0
值	0.059 4	-0.550	1.98	-3.64	4.27	-0.113

2.2 精度测试实验

利用完成标定的一字型传感器进行抗轴向位移测试。

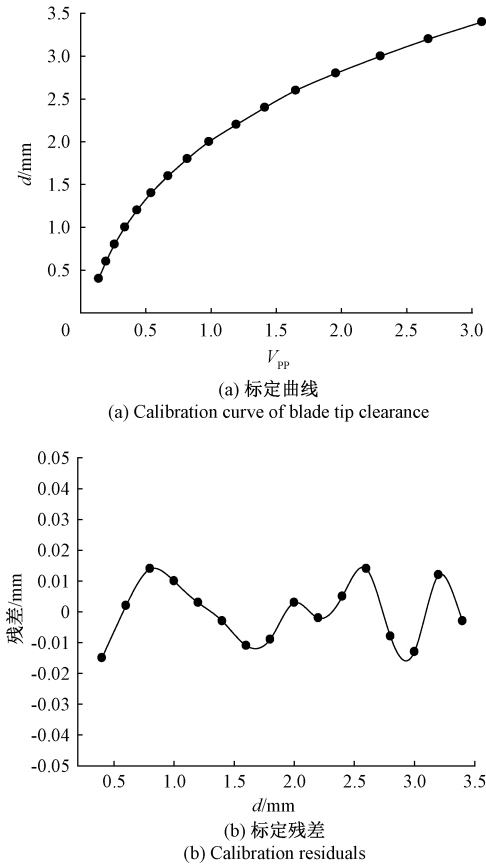


图 4 叶尖间隙标定曲线和标定残差

Fig. 4 Blade tip clearance calibration curve and calibration residuals

模拟篦齿盘转动时,调节径向数显千分尺使叶尖间隙置于待测试值(本文选择的典型叶尖间隙测试值 d_i 为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 mm)。每个叶尖间隙测试值下,通过径向数显千分尺产生 $-1 \sim 1$ mm 的轴向位移(a)并测得相应的叶尖间隙值 d_m ,整个测试结果如图 5 所示。可以看出,3 mm 量程内,一字型传感器在篦齿发生 ± 1 mm 轴向位移时也能保证最低 $45.4 \mu\text{m}$ 的测量精度,满足实际工程中对叶尖间隙测量需求。

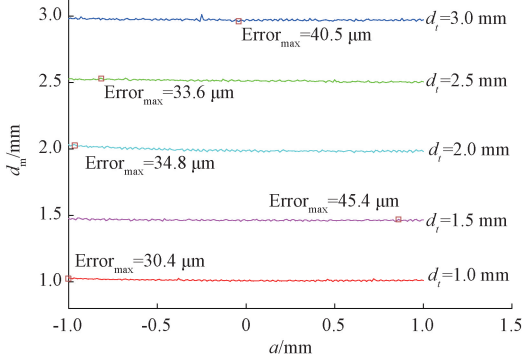


图 5 ± 1 mm 轴向位移下的叶尖间隙精度测试结果

Fig. 5 Results of blade tip clearance precision measurement under the axial displacement of ± 1 mm

3 现场试验

接着在某型发动机低压涡轮上进行台架试验。如图 6 所示,先是采用激光焊接的方式将 12 支一字型传感器布置在低压涡轮带冠叶片的 1、4、7 级共 12 个测点上,每级等角度均布 4 个测点。同时为了避免带冠叶片旋转过程中与一字型传感器探头发生碰摩,每支传感器焊接安装时相对机匣内壁会有一定的回缩量。3 级 12 测点的具体布局角度、安装回缩量如表 3 所示,其中 L 表示叶片级数,P 表示测点。然后将 12 支传感器用延长线缆连接至 12 通道的间隙测量系统并开启测量系统,最后按照加速-保持-停机三阶段各 200 s,转速 $0 \sim 2\ 000$ RPM 的条件运行低压涡轮并进行带冠叶片 12 通道叶尖间隙同步测量。

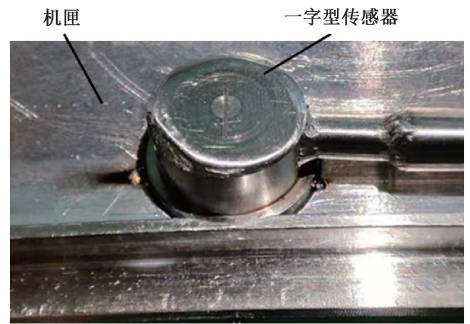


图 6 一字型传感器激光焊接安装示意

Fig. 6 Sensor laser welding schematic

表 3 测点布局

Table 3 Layout of measuring points

通道号	周向角/(°)	安装回缩量/mm
L1P1	3	1.12
L1P2	93	1.12
L1P3	183	1.15
L1P4	273	1.12
L4P1	6	1.26
L4P2	96	1.46
L4P3	186	1.27
L4P4	276	1.27
L7P1	21	1.31
L7P2	111	1.21
L7P3	201	1.03
L7P4	291	1.26

图 7~9 分别展示了低压涡轮 1、4、7 三级带冠叶片在发动机从 0 rpm 升速至 2 000 rpm 并保持一段时间然后停机这一过程的叶尖间隙变化。每张图中同一级 4 个测点叶尖间隙变化趋势基本相同,说明研制的多通道间隙测量系统具备叶尖间隙测量稳定性和可靠性,同时展示了周向不

同位置测点间的差异,即 P1、P2 测点比 P3、P4 测点的间隙更大,说明该低压涡轮旋转过程中转子轴心更偏向于 P3、P4 测点所在位置区域。不同图中的各级叶片叶尖间隙值及趋势的差异则体现了各级带冠叶片之间的几何结构、承受载荷以及所用传感器在结构、安装等方面的特异性。同时结合 3 张图可以看出,带冠叶片 3 级 12 测点的叶尖间隙值均随着转速升高至变小并在 400 s 的最大转速处达到最小叶尖间隙,之后又随着转速下降而变大。叶片被高转速下越来越大的离心力所“拉长”是造成图 7~9 中叶尖间隙与转速成反比关系的主要原因,并且这一行为在转速升、降过程引起的叶尖间隙变化是不对称的。

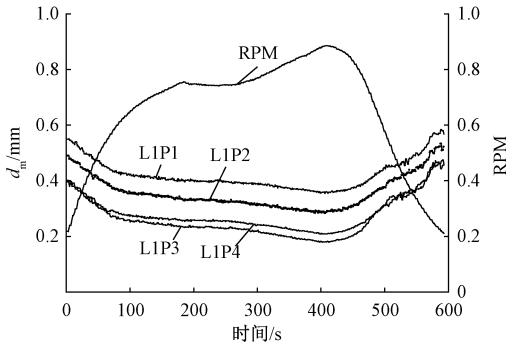


图 7 1 级叶片间隙测量结果

Fig. 7 Results of blade tip clearance measurement in stage 1

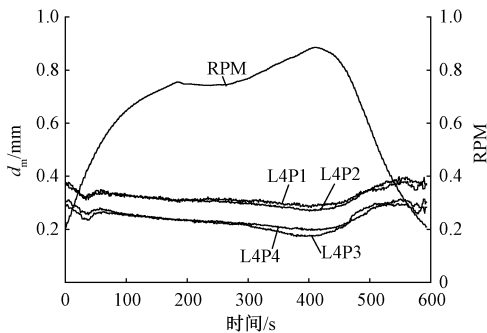


图 8 4 级叶片间隙测量结果

Fig. 8 Results of blade tip clearance measurement in stage 4

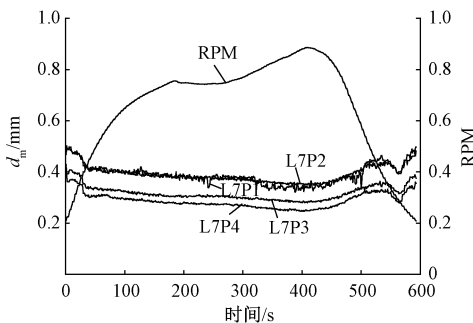


图 9 7 级叶片间隙测量结果

Fig. 9 Results of blade tip clearance measurement in stage 7

4 结 论

本文针对航空发动机多级带冠叶片叶尖间隙同时在线测量需求,建立了一字型芯极电容传感器测量篦齿叶尖间隙的模型,搭建了以一字型芯极电容传感器为基础的多通道间隙测量系统,并根据测量模型完成了系统测篦齿间隙的标定和精度测试实验,结果表明,3 mm 叶尖间隙内、±1 mm 轴向位移下的测量精度保持在 50 μm 内,说明了一字型传感器优秀的抗轴向位移能力,克服了带冠叶片因轴向载荷产生轴向位移带来的叶尖间隙测量误差或错误的难题。最后将 12 通道的测量系统应用于真实航空发动机的 3 级带冠叶片进行台架试验,准确清晰地展示了 2 000 rpm 升降速下的叶尖间隙监测结果,为发动机带冠叶片叶尖间隙的实时在线监测、主动间隙控制和后续故障诊断提供了技术支持,具有重大工程意义。

参考文献

- [1] ZHAO F T, JING X D, YANG M S, et al. Experimental study of rotor blades vibration and noise in multistage high pressure compressor and their relevance[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 870-878.
- [2] 肖林,雷小华,郭光辉,等.基于快速稀疏扫频干涉的动态间隙测量方法[J].仪器仪表学报,2022,43(9): 52-61.
- [3] XIAO L, LEI X H, GUO G H, et al. Dynamic clearance measurement method based on Fast sparse frequency-swept interferometry[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 52-61.
- [4] SUN H B, WANG J, CHEN K, et al. A tip clearance prediction model for multistage rotors and stators in aero-engines [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 343-357.
- [5] 牛广越,段发阶,周琦,等.基于微波相位差测距的叶尖间隙动态测量方法[J].航空学报,2022,43(9): 202-220.
- [6] NIU G Y, DUAN F J, ZHOU Q, et al. Dynamic measurement method for blade tip clearance based on microwave phase difference ranging [J]. Journal of Aeronautics, 2022, 43(9): 202-220.
- [7] 薛志飞,牛广越,易亮,等.涡扇发动机涡轮带冠叶片叶尖间隙测试[J].中国测试,2023,49(12): 16-22.
- [8] XUE ZH F, NIU G Y, YI L, et al. Research on tip clearance measurement of shrouded turbine blades of turbofan engine [J]. China Measurement & Test, 2023, 49(12): 16-22.
- [9] 郑芳芳,牛广越,易亮,等.基于 USB3.0 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.
ZHENG F F, NIU G Y, YI L, et al. Design of multi-channel blade tip clearance data acquisition system based on USB3.0[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(6): 874-880.
- [7] 吴军,陈杨,赵君伟,等. 基于激光自混合原理的涡轮叶片转速与叶尖间隙动态同步测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 13-21.
WU J, CHEN Y, ZHAO J W, et al. Dynamic synchronous measurement method for turbine blade speed and tip clearance based on laser self-mixing principle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 13-21.
- [8] 易亮,薛志飞,郑芳芳,等. 航空发动机碳纤维复合材料风扇叶片叶尖间隙测量研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(5): 673-679.
YI L, XUE ZH F, ZHENG F F, et al. Research on tip clearance measurement of carbon fibre reinforced plastics fan blades of aero-engine[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(5): 673-679.
- [9] 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): 82-108.
DUAN F J, NIU G Y, ZHOU Q, et al. A review of online measurement technology for blade tip clearance in aeroengines [J]. Journal of Aeronautics, 2022, 43(9): 82-108.
- [10] 李维双. 基于电容法的涡轮叶尖间隙测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
LI W SH. Research on turbine blade tip clearance measurement technology based on capacitance method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [11] 任瑞冬,陈钊. 基于 LabVIEW 的发动机叶尖间隙采集软件设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6): 77-81.
REN R D, CHEN ZH. Design of engine blade tip clearance acquisition software based on LabVIEW[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(6): 77-81.
- [12] JOUSSELIN O. Development of blade tip timing techniques in turbo machinery[D]. Manchester: The University of Manchester, 2013.
- [13] HATCHER C, BRINDISI J M. Method of determining the location of tip timing sensors during operation; US9530209B2[P]. 2016-12-27.
- [14] MOHAMED M, BONELLO P, RUSSHARD P. The determination of steady-state movements using blade tip timing data [C]. ASME Turbo Expo 2018; Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2018.
- [15] WANG W M, SHAO X, LI Q H, et al. Research on active disturbance rejection control method for turbine blade tip clearance [J]. Science China Technological Sciences, 2019, 62: 1795-1804.
- [16] ZHANG X L, WANG W M, CHEN K, et al. Five dimensional movement measurement method for rotating blade based on blade tip timing measuring point position tracking [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 161: 107898.
- [17] 李发富,段发阶,易亮,等. 基于频谱的篦齿轴向位移与叶尖间隙测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 261-270.
LI F F, DUAN F J, YI L, et al. Spectroscopy-based axial channeling and tip clearance measurement method of grate teeth [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 261-270.
- [18] 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 CH, DUAN F J, JIANG J J, et al. Blade tip clearance signal denoising method based on adaptive moving average and wavelet threshold[J]. Journal of Transduction Technology, 2021, 34(1): 34-40.

作者简介

易亮, 工程师, 主要研究方向为旋转机械结构间隙测试技术。

E-mail: 563497728@qq.com

牛广越(通信作者), 助理研究员, 博士, 主要研究方向为航空发动机、燃气轮机等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方法、信号处理算法。

E-mail: niuguangyue@tju.edu.cn