

发动机涡轮转子叶片叶尖定时信号干扰与抑制

刘美茹^{1,2}, 郜伟强², 代江波², 刘佳蓬², 卫靖澜², 乔百杰¹

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 介绍转子叶片叶尖定时非接触测量原理及光纤传感器工作特点。将带冷却的光纤传感器应用于发动机涡轮转子叶片振动测试, 获取高温高转速叶尖定时信号。结果显示, 转速大于 12 513 r/min(叶片测试位置工作温度 1 326 K)时, 脉冲信号出现严重干扰, 系统无法完成阈值触发和到达时间计时。分析干扰产生原因, 提出降低干扰的滤波和蓝光发射方法, 开展发动机涡轮转子叶片非接触测振试验, 结果表明: 滤波仅能够抑制红光辐射, 12 513 r/min 以上信号干扰有所改善, 12 605 r/min(叶片测试位置工作温度 1 375 K)以上仍存在干扰; 滤波结合蓝光发射能有效解决高温高转速下的干扰问题, 12 702 r/min(叶片测试位置工作温度 1 388 K)以下, 叶尖定时信号脉冲波形较好, 系统可有效实现阈值触发和到达时间计时。

关 键 词: 叶尖定时; 光纤传感器; 涡轮转子叶片; 辐射抑制; 振动测试

中图分类号: V263.6

文献标志码: A

Interference and suppression of tip-timing signal of engine turbine rotor blade

LIU Meiru^{1,2}, GAO Weiqiang², DAI Jiangbo², LIU Jiapeng², WEI Jinglan², QIAO Baijie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: The non-contact measurement principle of rotor blade tip timing and the working characteristics of optical fiber timing sensor were introduced. The optical fiber sensor with cooling was applied to the vibration test of engine turbine rotor blade to obtain the blade tip timing pulse signal under high temperature and high rotational speed. The results showed that when the rotational speed was greater than 12 513 r/min (working temperature at the blade testing position was 1 326 K), the pulse signal had serious interference, and the system cannot trigger the threshold and record the time of arrival. The causes of interference signal were analyzed, and the solutions of filtering and blue light emission to reduce signal interference were provided. The non-contact vibration test of engine turbine rotor blade was carried out to verify the proposed method. The results showed that the red light radiation can be suppressed only by filtering, and the signal interference above 12 513 r/min was improved, but the interference still existed when the rotational speed exceeded 12 605 r/min (working temperature at blade testing position was 1 375 K); the combination of blue light emission and filtering can effectively solve the interference problem under high temperature and high rotational speed. Below 12 702 r/min (working temperature of blade testing position was 1 388 K), the pulse waveform of blade tip timing signal was good, and the

收稿日期: 2022-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(52075414); 国家科技重大专项(2017-V-0009)

作者简介: 刘美茹(1987—), 女, 高级工程师, 博士生, 主要从事航空发动机振动测试技术研究。

通信作者: 乔百杰(1985—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机叶片健康监测研究。E-mail: qiao1224@xjtu.edu.cn

引用格式: 刘美茹, 郜伟强, 代江波, 等. 发动机涡轮转子叶片叶尖定时信号干扰与抑制[J]. 航空动力学报, 2023, 38(8): 1826-1836. LIU Meiru, GAO Weiqiang, DAI Jiangbo, et al. Interference and suppression of tip-timing signal of engine turbine rotor blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8): 1826-1836.

system allowed for effective triggering and timing.

Keywords: blade tip-timing; optical fiber sensor; turbine rotor blade; radiation suppression; vibration measurement

近年来,随着对现代航空发动机高性能的追求,涡轮前温度不断提升,致使涡轮转子叶片服役环境越来越严酷,对高温测量技术提出了更高要求。国内外航空研究所和高校逐步认识到发动机涡轮转子叶片高温应力/应变测量的重要性和紧迫性。传统应变接触式测试技术是将应变计直接安装在转子叶片上,然而,高温状态下应变计存活率较低,甚至出现 1 次试验,所有应变片均失效的情况,无法实现全周期监测涡轮转子叶片振动特性。因此,国内外有学者针对航空发动机耐高温涡轮转子叶片非振动测量方法进行了研究^[1-4]。其中,叶尖定时技术已成为取代应变计测试,实现全周期在线测量最有潜力的技术^[5-7]。

英国罗-罗公司从 20 世纪 80 年代开始研发叶尖定时技术,在叶尖定时传感器布局、信号处理、不确定性分析等方面有诸多研究,推进了叶尖定时技术工程应用进程^[8-9]。曼彻斯特大学学者针对叶尖定时传感器的布局方式,提出基于条件数排列的方法,这是对传统排列方法的突破,该方法考虑了数据敏感性和感兴趣激励阶次的影响^[10]。国内,天津大学段发阶教授团队研究了叶尖定时信号的系列振动分析方法,并将其应用于风扇转子叶片振动测试^[11-12]。西安交通大学敖春燕等开展了基于非接触式测量的转子叶片动应变反演重构研究,在高速旋转试验台实现了单模态关键位置动应变重构^[13],多模态全场动应变重构^[14]。国防科技大学 Lin 等将稀疏重构算法运用到叶尖定时欠采样信号处理中,实现对叶片振动频率的有效识别^[15]。上述国内外研究工作在冷端叶片振动非接触式测量取得较多研究成果。

在涡轮转子叶片振动测试方面,国内外鲜有研究报道。捷克西波西米亚大学学者利用 3 支电涡流传感器和 2 支新型光纤传感器测试汽轮机末级带冠叶片的振动^[16]。印度学者利用两种叶尖定时传感器,通过确定叶片的 1 阶模态频率偏移量进而辨识低压涡轮转子叶片的裂纹^[17]。国内尚处于涡轮转子叶片振动测试研究的初级探索阶段。2019 年,四川燃气涡轮研究院刘美茹等率先开展带冷却的光纤传感器耐温特性和涡轮转子叶片叶尖定时信号采集研究试验,对叶尖定时原理应用

于涡轮转子振动测试进行了初步探究^[18]。

本文基于文献^[18]中关于高温光纤传感器冷却方式的研究结果,将该高温光纤传感器应用于发动机涡轮转子叶片振动测试,并且根据涡轮叶片 H 型叶尖定时信号输出结果,解决 H 型叶片信号的两次触发问题,有效利用非接触式振动系统获取了涡轮转子叶尖定时电压信号。但应用过程中发现,在发动机转速高于 12 513 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 326 K)时,系统无法有效触发和计时。本文根据叶尖定时电压信号典型转速下的特点,介绍高温高转速下叶尖定时信号异常现象,分析异常信号产生原因,并给出解决异常信号的两种方案。通过开展叶尖定时信号滤波和蓝光发射两种方法的验证试验,结果表明蓝光发射与滤波结合的方式具有更好的解决效果,对后续涡轮转子叶片高温高转速下叶片非接触振动测试具有指导性作用。

1 转子叶片非接触式振动测量原理

1.1 基本原理

图 1 为叶片非接触式振动测量系统原理示意图。叶尖定时传感器垂直对中安装在机匣上,通过凸台孔等结构保证传感器与叶尖的距离。旋转叶片和轮缘通过传感器将分别产生高低电平信号,从而形成系列时间脉冲信号。当叶片不振动时,其理想到达时间可以根据转子转速及叶片所在位置计算出。然而实际工作中,叶片总是具有一定的振动水平,此时叶片的实际到达时间,即脉冲到达时间将会发生改变,通过实际与理想到达时间的差值,并参考转速基准信号,可以计算出整级叶片的振动参数信息^[19-20]。

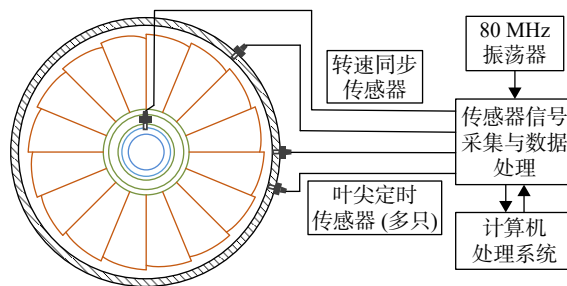


图 1 非接触振动测量系统工作原理

Fig. 1 Principle of non-contact vibration measurement system

1.2 非接触振动测量系统组成

图 2 所示为美国 HOOD 公司非接触式振动测量系统。本文采用带冷却的光纤传感器测量涡轮转子叶片振动,所用非接触振动测试系统计数器时钟频率为 80 MHz。

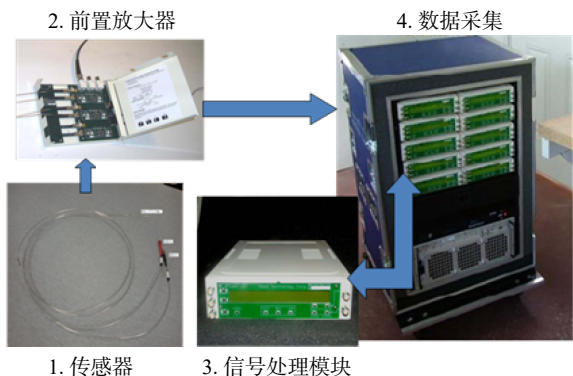


图 2 转子叶片非接触振动测试系统

Fig. 2 Non-contact vibration measurement system of rotor blades

2 光纤传感器

旋转叶片振动叶尖定时传感器主要有 3 种,分别为电涡流传感器、电容传感器和光纤传感器。电涡流传感器的输出信号在高温状态下测量精度相对较低。电容传感器可在高温环境下进行测试,但其主要应用在叶尖间隙的测量上,测量叶尖振幅时精度也较低。冷却条件下的光纤传感器不仅灵敏度高,亦可对 1 473 K 环境温度下的叶尖振幅进行测量。所以本文试验采用耐高温光纤传感器。

通过获得叶片到达叶尖定时光纤传感器的时间,进而结合转速信息计算叶片振动位移。原则上,叶片距离传感器距离越远时两者之间电压差越大,触发电压选择范围越宽,可最大程度消除丢失或增加叶片达到时间。本文所用的光纤叶尖定时传感器最大输出电压为 7.5 V,即传感器打在发动机轮缘与叶尖的电压范围为 0~7.5 V。

耐高温光纤传感器实物如图 3 所示。典型高压涡轮转子叶片叶尖结构如图 4 所示,为 H 型结构。典型光纤传感器测试涡轮转子叶片叶尖定时信号如图 5 所示。从图 5 中可以看出,传感器发射光信号打在叶尖、轮缘及凹槽位置时,输出电压均大于 1 V,将触发电压设置范围为 1~5 V,可以实现 1 个叶片到达时触发 1 次。

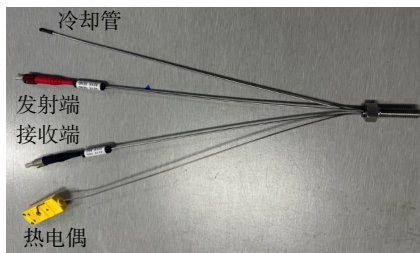


图 3 涡轮端光纤传感器基本结构

Fig. 3 Basic structure of optical sensor on turbine

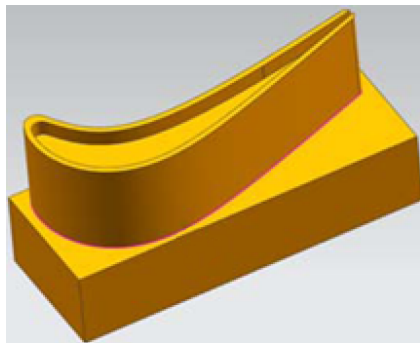


图 4 涡轮端 H 型叶片示意图

Fig. 4 Sketch map of H profile turbine blades

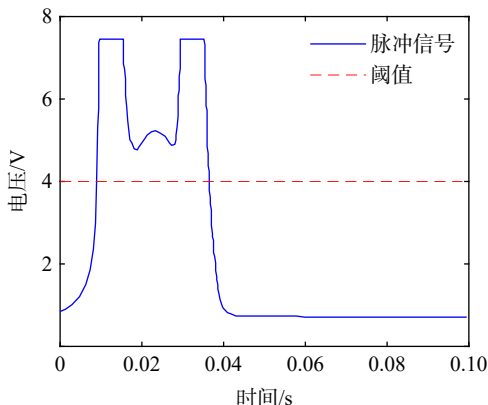


图 5 高压涡轮单个叶片典型定时信号

Fig. 5 Typical timing signal for a single high-pressure turbine blade

3 涡轮转子叶片叶尖定时信号干扰现象

试验中,将 3 支带冷却的光纤传感器安装于某发动机涡轮转子机匣,光纤传感器的接收端、发射端与前置放大器对应连接,前置放大器通过屏蔽线与信号调理模块连接,然后再通过网线与数据采集和分析系统连接。前置放大器内置红外光激光器,波长为 660 nm,输出功率为 50 mW。

本次试验,发动机进气温度和压力均较高,最高转速为 12 800 r/min,此时传感器测试位置对应

的涡轮叶片工作温度为 1 423 K, 该值是根据发动机试验过程中, 提前布置的热电偶实测的涡轮后平均温度, 进而通过性能仿真计算得到。

冷却条件下, 传感器热电偶显示传感器最高工作温度仅为 773 K, 未出现超过光纤许用极限温度(923 K)的情况, 故本文只对第 1 支传感器叶尖脉冲电压信号进行分析。

试验过程中, 传感器输出电压信号显示, 当发动机转速低于 12 513 r/min 时(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 326 K), 叶尖定时电压信号正常; 当发动机转速高于 12 513 r/min 时, 叶尖定时输出电压信号出现异常现象。典型转速下, 传感器输出电压信号如图 6 所示, 具体参数设置见表 1。可知, 当转速低于 12 513 r/min 时, 叶

片叶尖经过传感器时, 输出电压较高, 轮缘经过时, 输出电压较低, 通过设置合理的放大倍数, 可以找到一个最优的触发电压, 使叶尖定时系统有效计时。且随着转速升高, 传感器测量电压差变大, 因为转速升高, 叶尖间隙变小, 传感器离叶尖越近, 则输出电压信号效果越好。然而当转速大于 12 513 r/min 时, 传感器输出信号异常。从图 6(d)中可以看出, 当转速为 12 513 r/min 时, 传感器电压信号相对混乱, 已经无法区分叶片和轮缘到达传感器时的交替电压高低变化信号。从图 6(e)中可以看出, 当转速为 12 800 r/min 时(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 423 K), 干扰信号完全掩盖了叶尖定时信号, 此时信号噪声极大, 叶尖定时非接触式振动系统失效。

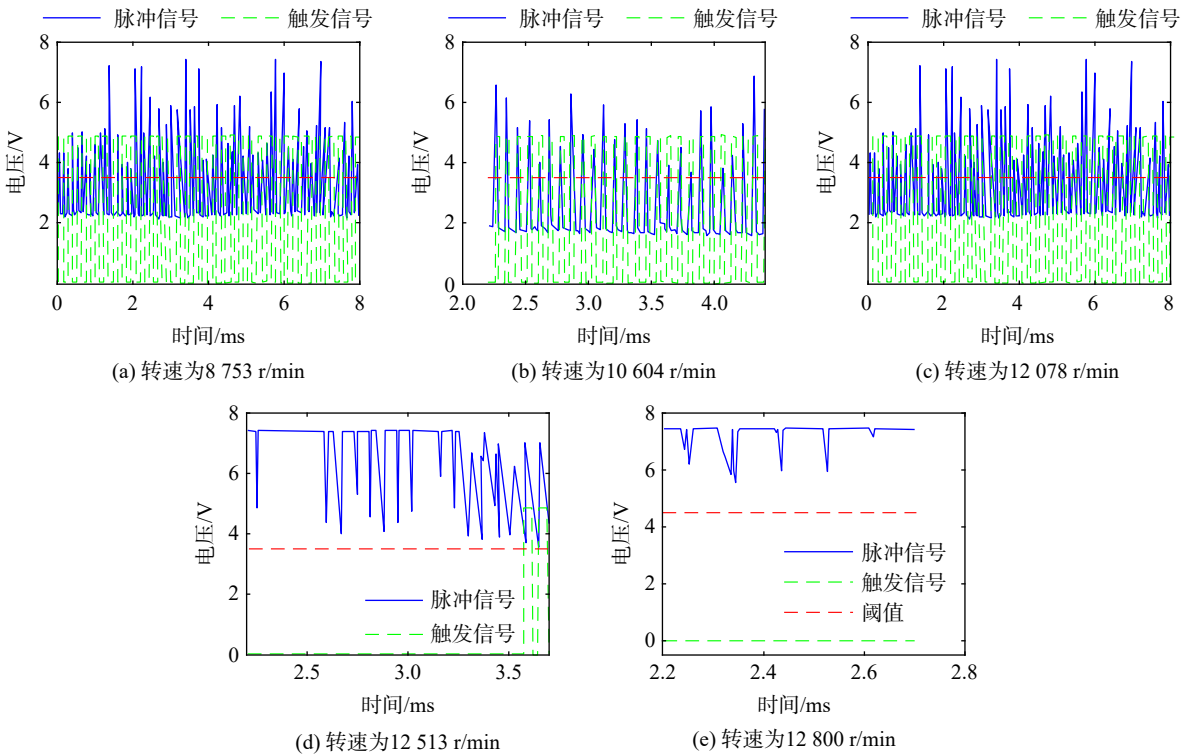


图 6 各典型转速下叶尖定时脉冲信号(无滤波)

Fig. 6 Blade tip-timing pulse signal at typical rotational speeds (unfiltered)

表 1 各典型转速下叶尖定时电压信号对比

Table 1 Voltage signal comparison of tip-timing at typical rotational speeds

转速/(r/min)	工作温度/K	叶尖电压/V	轮缘电压/V	放大倍数	干扰电压/V	是否触发
8 753	726	4.0	2.5	2		是
10 604	1 165	5.0	1.7	2		是
12 078	1 177	5.5	1.0	3		是
12 513	1 326	7.5	3.5	5	7.5	否
12 800	1 423	7.5	5.5	3	7.5	否

4 叶尖定时干扰信号原因

为了确定上述光纤传感器输出电压异常信号原因,对于光纤传感器的光纤传输损耗情况进行研究。为了防止过强的激光对旋转叶片造成不可逆的损伤,光纤传感器的光纤输出功率不能过大。本次试验用光纤传感器内部为镀金石英光纤,图7为镀金石英光纤的传输损耗曲线,可以看出这种镀金石英光纤在较大的波长范围(300~800 nm)内均有较好的传输能力。本次试验过程中,传感器距离叶尖3 mm,光纤传感器接收到的反射光强微乎其微。此外,在实际的高温涡轮叶尖定时测量中,光纤传感器会接收到各类的辐射干扰。尤其在高温、高转速状态下,涡轮转子叶片的工作条件复杂,各种辐射干扰的强度往往较大,可能会导致采集到的叶尖定时信号信噪比降低,甚至出现干扰辐射掩盖正常的叶尖定时信号^[21-22],即图6(d)、图6(e)所示的异常信号。这种辐射干扰分为叶片及叶盘黑体辐射和高温燃气及碳烟辐射。

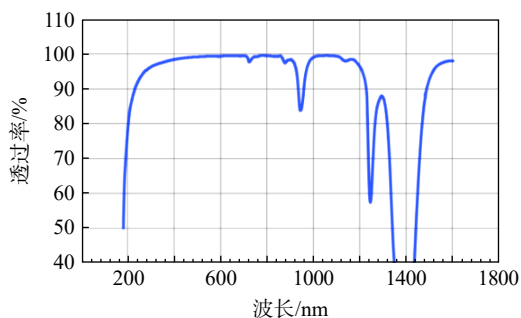


图7 石英光纤的传输损耗曲线

Fig. 7 Transmission loss curve of silica fiber

4.1 高温燃气及碳烟光辐射

气体辐射相比固体辐射而言具有更强的光谱选择性,其辐射特性难以准确计算。此外,气体辐射在某些波长区段内具有辐射和吸收能力。这种有辐射能力的波长区段称为光带。

发动机试验过程中,采用航空煤油作为燃料,燃烧气体产物主要有氮气、水蒸气以及二氧化碳,同时可能存在少量的一氧化碳或者氧气。在高温条件下,氮气以及氧气既不吸收辐射也不产生辐射,而二氧化碳与水蒸气则由于分子结构,具有较强的辐射能力。

高温碳烟的辐射如图8所示,高温碳烟性质与黑体辐射相似。而高温燃气则以谱带的形式发出强烈的辐射,在辐射谱带外呈现透明的性质,

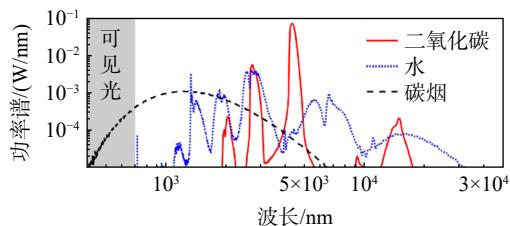


图8 高温燃气及高温碳烟辐射示意图

Fig. 8 Sketch map of radiation of high temperature gas and carbon fume

既不发射辐射也不吸收辐射。

4.2 叶片及叶盘黑体辐射

光纤式叶尖定时传感器在采集叶尖的反射光时,也会采集到燃气轮机内部叶片以及叶盘在高温下的辐射。物体温度高于绝对零度就会向外发出辐射,物体向外辐射能量的能力由其自身的温度和材料决定。

黑体是理想的辐射源,是一种对入射辐射完全吸收而与其波长、入射方向及偏光状态无关的理想辐射体。黑体的辐射满足普朗克定律、维恩位移定律和斯蒂芬-玻尔兹曼定律^[23]。

其中普朗克公式描述的是黑体辐射出射度 M_b 与温度、波长之间的关系为

$$M_b(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中 $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$,为第一辐射常数; $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$,为第二辐射常数; λ 为波长; T 为热力学温度。

图9为利用普朗克公式绘制的温度在700~1500 K的黑体辐射出射度随波长变化的曲线,从中可以看出黑体辐射出射度在不同温度下随波长的变化而变化。

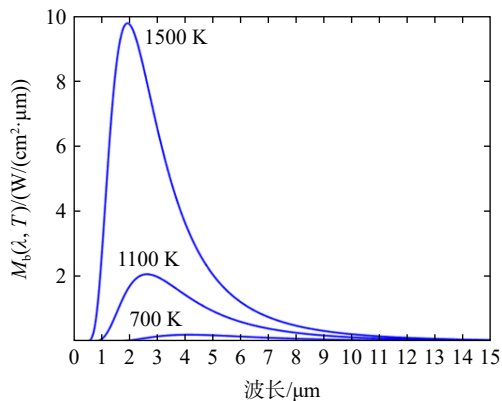


图9 不同温度下的普朗克曲线

Fig. 9 Planck curves of different temperatures

该定律描述的是黑体单位表面积向整个半球空间发射的所有波长的辐射出射度 $M_b(T)$:

$$M_b(T) = \int_0^\infty M_b(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2)$$

式中 $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为斯特藩-玻尔兹曼常数。

由式(2)以及图9可以看出, 黑体辐射能量与其自身温度成正比关系。与理论的黑体不同, 现实物体均为灰体, 两者之间的转换率用 ε 表示:

$$\varepsilon = \frac{M(\lambda, T)}{M_b(\lambda, T)} \quad (3)$$

式中 $M(\lambda, T)$ 为物体实际的全辐射出射度, $M_b(\lambda, T)$ 为相同条件下理想黑体的全辐射出射度。 ε 一般小于1, 其具体值需要实际测量, 由于高温燃气轮机内部的叶片有 TBC(thermal barrier coatings) 涂层, 在高温环境下发射率较高, 整体接近黑体。1573 K 时的普朗克曲线如图10所示, 由斯特藩-玻尔兹曼定律可知在 1573 K 时, 黑体的全辐射出射度为 $3.47 \times 10^5 \text{ W}/\text{m}^2$ 。1573 K 为该型号发动机工作过程中涡轮前最高工作温度。

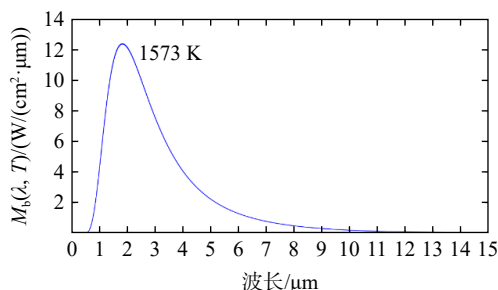


图10 1573 K 时的普朗克曲线

Fig. 10 Planck curve at the temperature of 1573 K

黑体辐射光源属于朗伯发光体, 其光强分布为如图11所示, 发光强度 I_θ 与偏离放光面方向的角度 θ 有关, 垂直方向光强最大, 平行方向最小。其公式表达如下:

$$I_\theta = I_0 \cos \theta \quad (4)$$

式中 I_0 为垂直方向光强。对距离黑体辐射微元距离为 R 处的强度进行分析, 距离黑体辐射微元距离为 R 处的光强为

$$I = I_0 \cos \theta \frac{ds}{4\pi R^2} \quad (5)$$

式中 ds 为距离黑体辐射微元 R 处半球空间的面积微元。

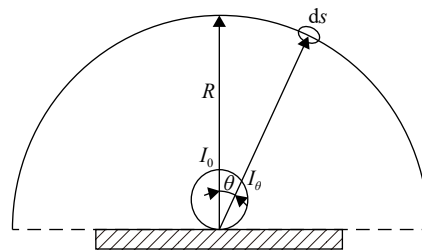


图11 黑体辐射传递示意图

Fig. 11 Sketch map of back-body radiation transfer

所使用的光纤式叶尖定时传感器采用如图12所示的光纤束结构, 光纤纤芯直径为 $200 \mu\text{m}$, 数值孔径 N_a 为 0.22。光纤采用光纤束结构, 光纤式叶尖定时传感器与转子叶片端面的安装间距通常为 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 。当安装间距为 5 mm 时, 将6根接收光纤视为单根粗光纤, 直径为 $600 \mu\text{m}$ 。

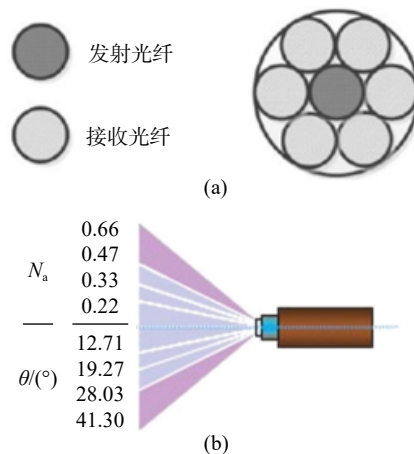


图12 光纤束结构及光纤数值孔径

Fig. 12 Fiber bundle structure and fiber numerical aperture

当叶尖正对传感器时, 此时光纤对叶片端面上能接收到辐射的面积为 $6.376 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 在不考虑不同角度发射率的情况下, 全辐射量为 1.8 W , 且辐射呈半球面方式向外发散, 因此光纤接收到的辐射量比值为 0.0018, 积分可以计算出此波段的辐射量为 $245.6 \mu\text{W}$ 。当叶盘正对传感器时, 叶盘距离光纤传感器端面 20 cm , 通过计算可知, 光纤接收到 $200 \sim 1250 \text{ nm}$ 波长的辐射量为 $155.0 \mu\text{W}$ 。

可以看出, 叶尖与叶盘在 $200 \sim 1250 \text{ nm}$ 波段发射出的辐射干扰在 $100 \mu\text{W}$ 量级。这里的辐射干扰是用总辐射量减去光纤接收到的辐射量计算而来的。由于接收光纤接收到的反射光强通常在发射光强的百分之一到千分之一的范围内, 此时发射激光的光强需要在 $1 \sim 10 \text{ W}$ 以上才能保证

叶尖定时信号信噪比满足测量需求,而本次试验用前置放大器的激光功率为 50 mW。因此,叶片及叶盘黑体辐射是辐射干扰的主要原因之一。

5 干扰信号抑制方案

5.1 红光发射与滤波

从光纤式叶尖定时传感器的工作原理可以看出,对辐射干扰的抑制可以从激光光源以及传输光路等方面入手。从上述不确定因素分析中可以看出,当温度为 1 573 K 时,黑体辐射以 $2\text{ }\mu\text{m}$ 波长左右的红外辐射为主。而试验用激光光源为波长 660 nm 红外光,所使用的 PIN 光电二极管的光谱接收范围为 $400\sim 1\text{ }100\text{ nm}$,此波段之外的黑体辐射均不能被接收并转换为电信号,但此波段内的辐射干扰强度依旧较强。所以,试验过程中,在传感器接收端使用 $(660\pm 10)\text{ nm}$ 的窄带滤光片,高温气体的辐射被全部过滤,且其他波长的红光将被全部滤掉,从式(1)可以计算出, $650\sim 670\text{ nm}$ 波段的黑体辐射量相比 $400\sim 1\text{ }100\text{ nm}$ 波段的黑体辐射量 3.16% 下降至 0.016 5%。

将上述带冷却的光纤传感器安装于同一台发动机涡轮转子对应机匣的同样位置上,采用相同方式对传感器进行冷却,采用滤波模块进行滤波,

即高于 670 nm 和低于 650 nm 的红光才能通过。滤波器安装方式如图 13 所示,传感器的输出端 1 经过滤波模块输入端 2,滤波模块输出端 3 接入前置放大器输入端 4,实现传感器的滤波功能,传感器输入端 5 直接输入前置放大器发射端 6。

发动机最高运转至 12 800 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 423 K)。第 1 支传感器输出电压信号如图 14 所示,具体数值见表 2 所示。从图 14 和表 2 中可以看出当转速低于 12 605 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 357 K)时,传感器打在叶尖时,输出电压信号正常,可以找到一个最优的触发电压,使系统计时,计算叶片振动。但随着发动机转速逐渐升高,当转速高于 12 605 r/min 时,其输出信号

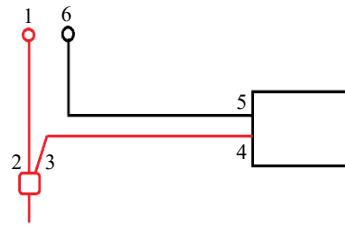


图 13 非接触振动测试连接方法(滤波模块)

Fig. 13 Connection method of non-contact vibration (filter module)

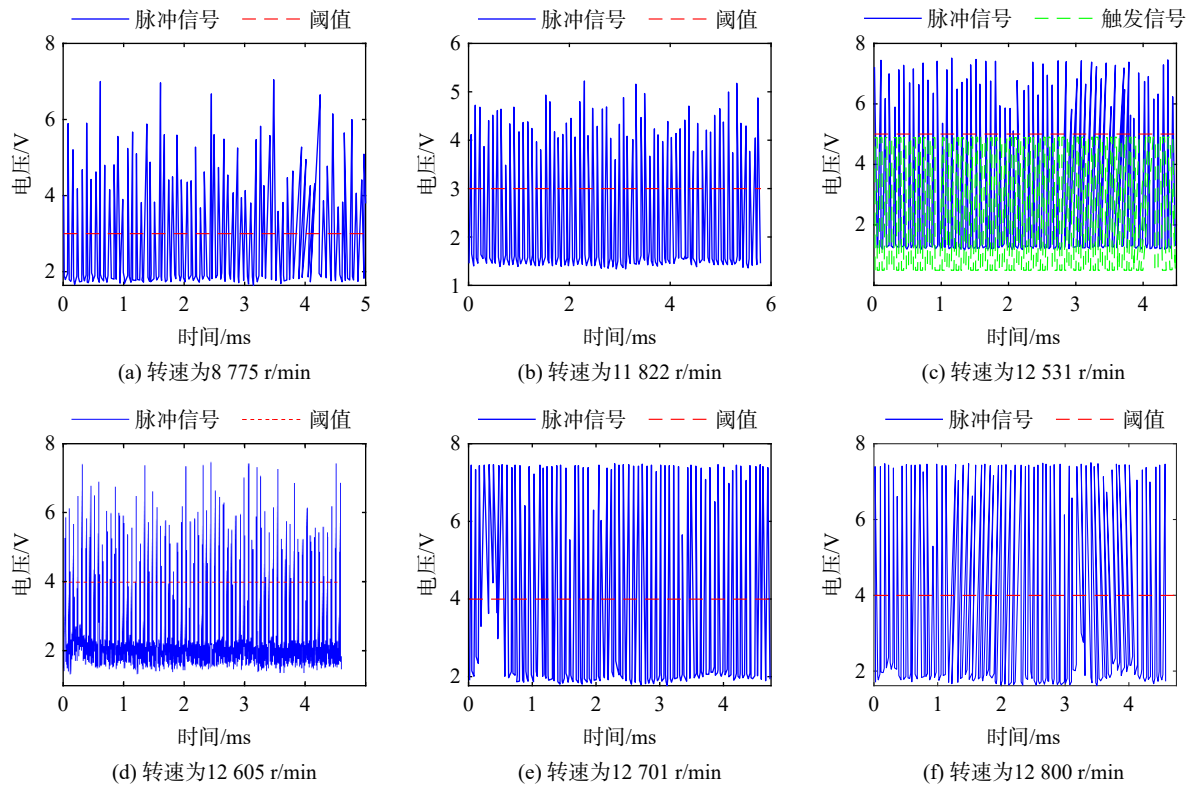


图 14 各典型转速下叶尖定时信号(红光滤波)

Fig. 14 Tip-timing signal at typical rotational speeds (red light filtering)

表 2 各典型转速下叶尖定时电压信号对比 (滤波)

Table 2 Voltage signal of tip-timing at typical rotational speeds (with filter)

转速/ (r/min)	叶片工作 温度/K	叶尖 电压/V	轮缘 电压/V	放大 倍数	干扰 电压/V	是否 触发
8 755	729	3.5	1.5	10		是
11 822	1 119	4.25	1.75	12		是
12 531	1 329	6.0	1.25	8		是
12 605	1 357	6.0	1.70	12	4.5	是
12 701	1 388	5.5	3.50	10	5.5	否
12 800	1 423	5.5	1.50	10	5.5	否

异常。从图 14(d)中可以看出,当转速为 12 605 r/min 时,设置系统的放大倍数为 12,传感器打在叶尖时,输出电压最低为 6 V,传感器到达轮缘时,电压为 1.7 V。但第 4 号、5 号叶片位置的轮缘辐射干扰仍然较大,干扰电压达到了 4.5 V。并且 4 号叶片叶尖到达时,也发生了辐射干扰现象,使 4 号、5 号叶片最大电压信号无法区分。从图 14(f)中可以看出,当转速为 12 800 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 423 K)时,设置系统的放大倍数为 10,传感器打在叶尖时,输出电压最低为 5.5 V,传感器到达轮缘时,电压值为 1.5 V。可以发现,部分叶片位置的轮缘辐射干扰仍然较大,干扰电压达到了 5.5 V。

从上述结果可以看出,通过接收端使用 (660 ± 10) nm 的窄带滤波器,前置放大器激光器仍然采用波长 660 nm 的红外光时,当发动机转速低于 12 605 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 357 K),传感器输出电压信号较好。当发动机转速高于 12 605 r/min,传感器信号辐射干扰现象仍然存在,相比无滤波器时的信号状态有所改善,但由于轮缘辐射干扰仍然较大,信噪比较低,系统无法触发、计算叶片振动。

5.2 蓝光发射与滤波

根据文中第 4.2 节中的黑体辐射原理,如果使用红光以外的其他激光光源并在光路上加装窄带滤光片(相应波长),通过滤光片对干扰辐射进行抑制,理论上可以从根本解决上述异常信号的问题。图 15 为 410 nm 蓝光滤光片的滤光示意图。可以看出,其在固定波段(400~420 nm)透过率最高为 86.5%,损耗较小,其余波段则无法透过,滤光片便于调整,而且成本较低,可以作为抑制辐射干扰有效方法。从式(1)可以计算出,使用

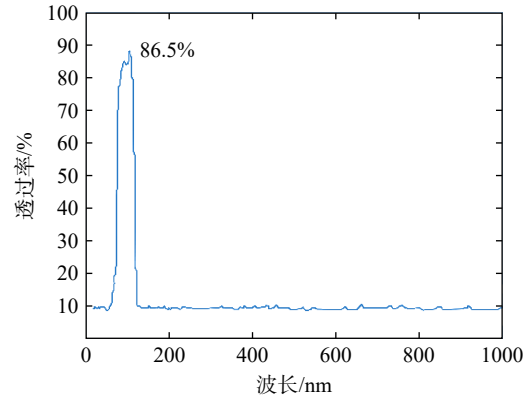


图 15 410 nm 滤光片滤光示意图

Fig. 15 Sketch map of 410 nm optical filter

410 nm 蓝光激光器并使用 (410 ± 10) nm 的窄带滤光片,黑体辐射量显著下降,仅为红外光时黑体辐射量千分之一。

同样,将上述带冷却的光纤传感器安装于同一台发动机涡轮转子对应机匣的同样位置上,采用相同的方式对传感器进行冷却,利用上述蓝光激光器,开展蓝光发射并滤波的涡轮转子叶片振动测试,具体连接方法如图 16 所示。发动机最高运转至转速 12 801 r/min。

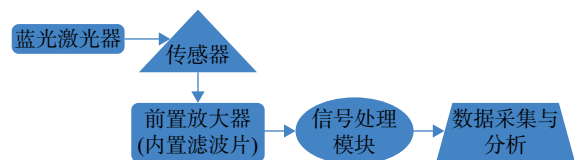


图 16 非接触振动测试连接方法(蓝光发射器)

Fig. 16 Connection method of non-contact vibration measurement (blue lighter emitter)

本次试验,轮盘 50 片叶片中 6 个叶片更换了全新加工的涡轮叶片,即未经过高温燃气加热、变色的叶片。图 17 所示为利用蓝光发射器进行叶片振动测试的叶尖定时电压信号,从图 17 中可以看出,6 片新安装的叶片输出电压信号信噪比较好,具体数值如表 3 所示。从图 17 和表 3 中可知,发动机最高运转至转速 12 702 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 423 K)过程中,电压信号结果较好。当设置系统放大倍数为 25,将触发电压设置范围为 2.5~4 V,可以每个叶片到达时触发一次。但当转速达到 12 801 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 423 K)时,当设置系统放大倍数为 25,将触发电压设置范围为 3.5~4 V,基本无法实现每个叶

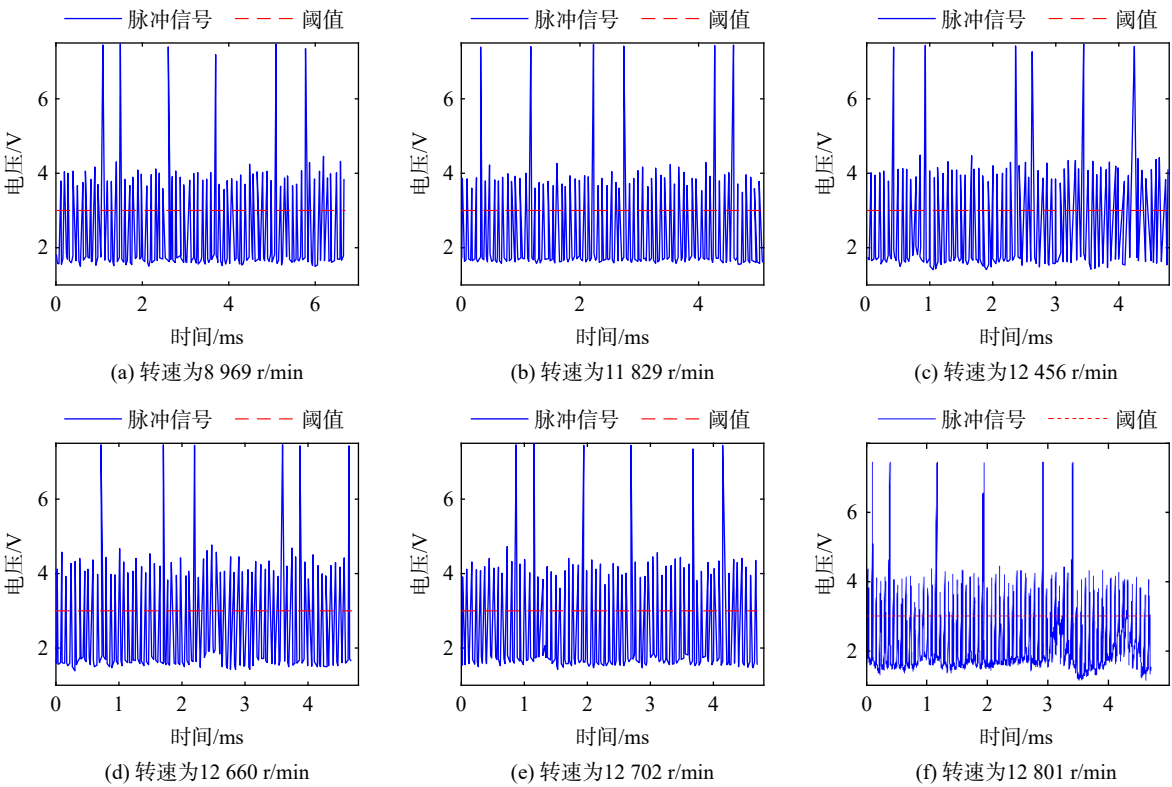


图 17 各转速下叶尖定时信号(蓝光滤波)

Fig. 17 Tip-timing signal at typical rotational speed (blue light filtering)

表 3 各典型转速下叶尖定时电压信号对比
(蓝光发射)

Table 3 Voltage signal of tip-timing at typical rotational speed (with blue lighter emitter)

转速/ (r/min)	叶片工作 温度/K	叶尖 电压/V	轮缘 电压/V	放大 倍数	干扰 电压/V	是否 触发
8 969	729	3.5	1.5	25		是
11 829	1 119	4.0	1.5	25		是
12 456	1 329	3.7	1.5	25		是
12 660	1 357	4	1.5	25	2.5	是
12 702	1 388	4	1.5	25	2.5	是
12 801	1 423	4	1.5	25	4.0	否

片到达时触发一次。

上述结果表明,通过外置蓝光发射器,发射 410 nm 蓝光,且在前置放大器中安装(410±10)nm 的窄带滤光片方式,发动机运转至转速 12 702 r/min 过程中,传感器输出的电压信号状态较好,未发生干扰现象。但当转速达到 12 801 r/min 时,传感器信号出现辐射干扰现象,且由于蓝光发射器本身输出信号较弱,干扰信号影响导致系统无法触发,无法计算叶片振动。

同时,从上述结果看出,即使将放大倍数设置

成 25 倍,除了新增 6 片叶片叶尖输出电压较大外,其余叶片输出电压均较小。分析原因有如下两点:第一是由于发动机涡轮部件经过上述前两次试验(分别为红光和红光加滤波两种情况进行的试验)的加热后变色导致的输出电压变小。第二是因为蓝光发射导致的输出电压较小,波段为 410 nm 的蓝光从激光器发射后,其经过光纤、光电接收器、耦合透镜等的透过率较波段为 660 nm 的红光低,所以造成其输出电压较小。为了获取较高信噪比的信号,后期可以适当提高蓝光发射器的发射功率,进一步增强传感器的输出电压。

6 结 论

本文针对高温高转速下叶尖定时信号异常现象,分析了异常信号产生原因,并给出了解决异常信号的两种方案,开展了叶尖定时信号滤波和红光发射加滤波以及蓝光发射两种方法的验证试验研究,得出以下结论:

1) 成功将带冷却的光纤传感器应用于涡轮转子叶片叶尖振动测试。当采用 660 nm 的红光发射前置放大器进行测试时,转速低于 12 513 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 326 K)时,传感器输出电压信号正常;当转速

大于 12 513 r/min 时,传感器的输出信号异常,出现干扰信号,系统无法有效触发、计时。

2) 通过上述理论分析与试验验证,可以判定光纤传感器出现异常信号的原因为叶片及叶盘黑体辐射和高温燃气及碳烟辐射,其中,叶片及叶盘黑体辐射是主要原因。

3) 采用(660±10)nm 滤波器的方式可以对辐射干扰进行抑制。结果显示当转速大于 12 605 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 357 K)时,传感器输出电压存在由辐射带来的干扰信号,系统无法触发、计时,但干扰信号的具体状态较无滤波器状态情况有所改善。采用 410 nm 蓝光发射加滤波的方式可以对辐射干扰进行抑制。结果显示,当转速低于 12 702 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 388 K)时,传感器输出电压信号较好,无干扰信号。但当转速达到 12 801 r/min(传感器测试位置对应的涡轮叶片工作温度为 1 423 K)时,传感器信号出现辐射干扰现象,且由于蓝光发射器本身输出信号较弱,干扰信号影响导致系统无法触发,也无法计算叶片振动。

4) 蓝光加滤波的方式对解决红光发射的辐射干扰现象有重要的作用。但由于蓝光发射过程中的功率损失较大,导致电压输出结果相对红光发射电压结果较低,建议后期采用更大功率的蓝光发射器进行叶片振动测试,提高信噪比。

参考文献:

- [1] 王奉明,朱俊强,徐纲. 基于整机试车的涡轮叶片高低循环复合疲劳试验技术[J]. 航空动力学报, 2018, 33(10): 2343-2350.
WANG Fengming, ZHU Junqiang, XU Gang. Test method for the combined high and low cycle fatigues of turbine blade based on the whole engine operation[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(10): 2343-2350. (in Chinese)
- [2] 宋兆泓,李其汉. 发动机强度振动测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [3] BARTSCH T M. High cycle fatigue (HCF) science and technology program 2002 annual report[R]. AFRL-PR-WP-TM-2004-2040, 2003.
- [4] ZIELINSKI M, ZILLER G. Noncontact crack detection on compressor rotor blades to prevent further damage after HCF-Failure[R]. NATO RTO-MP-AVT-121, 2005.
- [5] LIAO Linxia, KÖTTIG F. Review of hybrid prognostics approaches for remaining useful life prediction of engineered systems, and an application to battery life prediction[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 63(1): 191-207.
- [6] SIKORSKA J Z, HODKIEWICZ M, MA L. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(5): 1803-1836.
- [7] RIGOSI G, BATTIATO G, BERRUTI T M. Synchronous vibration parameters identification by tip timing measurements[J]. Mechanics Research Communications, 2017, 79: 7-14.
- [8] KNAPPETT D, GARCIA J. Blade tip timing and strain gauge correlation on compressor blades[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part G Journal of Aerospace Engineering, 2008, 222(4): 497-506.
- [9] MOHAMED M, BONELLO P, RUSSHARD P. A novel method for the determination of the change in blade tip timing probe sensing position due to steady movements[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 126: 686-710.
- [10] RUSSHARD P. Development of a blade tip timing based engine health monitoring system[M]. Manchester, UK: The University of Manchester, 2010.
- [11] 欧阳涛,段发阶,李孟麟,等. 旋转叶片异步振动全相位 FFT辨识方法[J]. 振动工程学报, 2011, 24(3): 268-273.
OUYANG Tao, DUAN Fajie, LI Menglin, et al. A method for identifying rotating blade asynchronous vibration by all-phase FFT[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(3): 268-273. (in Chinese)
- [12] 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 Tao, GUO Wenli, DUAN Fajie, 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)
- [13] AO Chunyan, QIAO Baijie, CHEN Lei, et al. Blade dynamic strain non-intrusive measurement using $L_{1/2}$ -norm regularization and transmissibility[J]. Measurement, 2022, 190: 110677.1-110677.11.
- [14] 敖春燕,乔百杰,刘美茹,等. 基于非接触式测量的旋转叶片动应变重构方法[J]. 航空动力学报, 2020, 35(3): 569-580.
AO Chunyan, QIAO Baijie, LIU Meiru, et al. Dynamic strain reconstruction method of rotating blades based on no-contact measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(3): 569-580. (in Chinese)
- [15] LIN Jun, HU Zheng, CHEN Zhongsheng, 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.
- [16] KUBÍN Z, MÍSEK T, HLOUS J, et al. Calibration of blade tip-timing sensor for shrouded 40" last stage blade[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 108: 88-98.
- [17] GURU S S, SHYLAJA S, KUMAR S, et al. Pre-emptive rotor blade damage identification by blade tip timing method[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(7): 072503.1-072503.4.
- [18] 刘美茹,朱靖,滕光蓉,等. 涡轮转子叶片非接触振动测试试验研究[J]. 振动工程学报, 2020, 33(6): 1216-1225.
LIU Meiru, ZHU Jing, TENG Guangrong, et al. Non-contact vibration measurement experiment of turbine rotor blades[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6): 1216-1225. (in Chinese)
- [19] 刘美茹,朱靖,滕光蓉,等. 非接触振动测试系统在航空发动机转子叶片振动测试中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(2): 45-48.
LIU Meiru, ZHU Jing, TENG Guangrong, et al. The application of non-contact vibration measurement system on the rotor blade vibration measurement of aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and

- Research, 2015, 28(2): 45-48. (in Chinese)
- [20] 刘美茹, 朱靖, 梁恩波, 等. 基于叶尖定时的航空发动机压气机叶片振动测量[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 1895-1904.
- LIU Meiru, ZHU Jing, LIANG Enbo, et al. Vibration measurement on compressor rotor blades of aero-engine based on tip-timing[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 1895-1904. (in Chinese)
- [21] GAO Shan, WANG Lixin, FENG Chi, et al. Analyzing the influence of combustion gas on a gas turbine by radiation thermometry [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73: 184-193.
- [22] PILKINGTON A, ROSIC B, TANIMOTO K, et al. Prediction of natural convection heat transfer in gas turbines[J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2019, 141: 233-244.
- [23] SUMAN A, CASARI N, FABBRI E, et al. Generalization of particle impact behavior in gas turbine via non-dimensional grouping[J]. [Progress in Energy and Combustion Science](#), 2019, 74: 103-151.

(编辑: 陈 越)