

## 基于统计特征的航空发动机风扇外物撞击检测\*

张 帅, 雷晓波, 张霞妹, 张强波, 文 敏

(中国飞行试验研究院 发动机所, 陕西 西安 710089)

**摘 要:** 为了检测识别航空发动机工作过程中的风扇外物撞击事件, 采用非接触叶尖振动测量系统对风扇叶片叶尖振动位移进行实时采集与检测。通过风扇叶片非接触叶尖振动位移数据统计分析, 发现叶尖振动位移服从正态分布, 并采用Epps-Pulley假设检验证明。设计了基于统计特征的风扇叶片外物撞击叶尖振动位移检测算法, 采用该方法获取了风扇转子不同转速下外物撞击叶尖振动位移检测阈值。对风扇转子转速为3000r/min状态下, 直径16mm、质量为2.9g的外物弹体撞击风扇叶片的振动位移数据进行分析, 并采用高速摄像系统对该方法识别结果的可靠性进行验证。结果表明: 基于统计特征的发动机风扇外物撞击检测方法, 能够准确识别外物撞击风扇叶片事件及发生撞击的叶片编号。

**关键词:** 航空发动机; 外物撞击; 叶尖振动; 非接触测量; 统计特征; 在线检测

**中图分类号:** V231.92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4055 (2020) 10-2325-07

**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.190401

## Foreign Object Impact Detection of Aero-Engine Fan Based on Statistical Characteristics

ZHANG Shuai, LEI Xiao-bo, ZHANG Xia-mei, ZHANG Qiang-bo, WEN Min

(Power-Plant Institute, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** In order to detect and identify the foreign object impact events of fan in the process of aero-engine operation, a non-contact tip vibration measurement system was used to collect and detect the vibration displacement of fan blade tip in real time. According to the statistical analysis on non-contact blade tip vibration displacement data of fan, it is found that vibration displacement of fan blade tip obeys normal distribution, which is proved by Epps-Pulley hypothesis test. Based on the statistical characteristics, an algorithm for detecting the vibration displacement of the blade tip impacted by the foreign object is designed. Meanwhile, with this method, the detection threshold of the vibration displacement of blade tip impacted by the foreign object is obtained at different rotational speeds of the fan. The vibration displacement data of the projectile with the diameter of 16mm and the mass of 2.9g impacting on a fan blade at the rotor speed of 3000r/min are analyzed. Furthermore, the reliability of the identification result is verified by a high-speed camera system. The results show that the detection method based on statistical characteristics can accurately identify the event of foreign object impacting the fan blade and the number of the impact blade.

**Key words:** Aero-engine; Foreign object impact; Blade tip vibration; Non-contact measurement; Statistical characteristics; On-line detection

\* 收稿日期: 2019-06-12; 修订日期: 2019-09-09。

基金项目: 航空工业联合基金 (6141B05110201); 航空科学基金 (2019ZD030006)。

通讯作者: 张 帅, 硕士, 工程师, 研究领域为动力装置结构特性与强度试飞。E-mail: 18792788842@163.com

引用格式: 张 帅, 雷晓波, 张霞妹, 等. 基于统计特征的航空发动机风扇外物撞击检测[J]. 推进技术, 2020, 41(10): 2325-2331. (ZHANG Shuai, LEI Xiao-bo, ZHANG Xia-mei, et al. Foreign Object Impact Detection of Aero-Engine Fan Based on Statistical Characteristics[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10):2325-2331.)

## 1 引言

在飞机的起飞、降落或低空飞行等过程中,由于发动机的强大吸力,会将石子、金属碎屑、冰块、飞鸟等吸入进气道内,撞击在发动机前端的风扇叶片或其它关键部位,给发动机的性能和机构带来不利影响,甚至产生严重的非包容性事故<sup>[1-2]</sup>。因此,及时可靠地检测出风扇叶片发生外物撞击事件、发出警报信号并给出合理的处置措施及建议,可有效地保障飞行安全<sup>[3]</sup>。

美国在1978年开展了基于应变测量的外物撞击试验与数值计算研究,通过大量试验得出了叶片应力变化规律与外物撞击物半径、质量、撞击角度、撞击位置、撞击速度之间的规律关系<sup>[4]</sup>。英国于2008年在RB168-101发动机上开展大量的外物撞击试验,以验证外物撞击监测报警系统的识别能力<sup>[5-6]</sup>。

慕琴琴等<sup>[7]</sup>基于冲击动力学理论,建立了离心预应力作用下叶片外物撞击的非线性动力学模型及旋转叶片受鸟体撞击的有限元分析模型,获取了不同离心力预载作用下的外物损伤规律;尹冬梅等<sup>[8-9]</sup>利用有限元法对发动机叶片受不同几何形状外物撞击进行分析,获取其叶片中残余应力场的分布,并研究了不同撞击位置及撞击速度对叶片瞬态响应及损伤的影响;刘超等<sup>[10-12]</sup>开展了外物损伤模拟及疲劳强度的预测试技术,并采用空气炮发射外物撞击静止TC4平板叶片,研究其叶片外物撞击的宏观与微观损伤特征。通过总结分析发现,国内发动机科研工作者关于外物撞击方面的研究主要集中于模拟外物撞击叶片的有限元仿真与静态叶片外物撞击试验模拟,这些研究为外物撞击叶片的物理原理、外物撞击叶片的损伤、外物撞击叶片的载荷等积累了大量的试验数据,同时也为叶片外物撞击损伤的计算研究提供了丰富的对比数据。南京航空航天大学在静止状态整级风扇叶片的外物撞击试验和测试仪器的设计及使用等方面进行了深入的研究,其中整级风扇叶片的模拟鸟撞试验为某型发动机的定型奠定了基础<sup>[13-14]</sup>。国内开展的外物撞击试验研究主要集中在大尺寸外物撞击未旋转部件试验上,由于真实发动机处在高速旋转状态,利用平板模拟叶片外物撞击过程无法考虑到外物与转子之间的相互作用,很难科学得出外物撞击风扇叶片的瞬间载荷特性和叶片形变历程。

基于发动机参数的波动来识别外物撞击事件是十分困难的。由于发动机工作过程复杂多变,常用

发动机状态参数在稳态就处于一定的波动状态,外物撞击瞬间可能会引起某些状态参数产生小波动,通过分析外物撞击与发动机参数之间的关系,试图找出外物撞击与某个/某组发动机参数之间固定且明显的规律关系是比较困难。外物撞击叶片瞬间虽会引起叶片及承力结构载荷发生较大的动态变化,但发动机机载振动传感器大多位于机匣安装边上,撞击位置与振动传感器之间的载荷传递路径很复杂,且振动本身是发动机多种结构动态信息的综合体现,依靠机载振动检测识别外物撞击事件的发生也是极为困难的,同时也不能保证较高的检测准确率。大量的外物撞击飞行事故分析结果也验证了:通过判断发动机参数是否异常或突变,在大部分情况下是无法明确判断发动机是否遭遇较严重外物撞击事件。而对于一般的外物撞击事件而言,该方法除了识别困难和准确率无法保障外,也不能定位叶片撞击编号、位置,不能较准确反映出外物撞击与响应之间的定性关系,不能为建立视情维修制度提供准确可靠的信息。因此,基于发动机参数波动识别外物撞击事件这条途径是极其困难的,且无法保证较高的识别准确率。

本文通过风扇叶片外物撞击试验平台来模拟真实发动机叶片受到外物撞击的过程,利用基于叶尖定时的非接触式叶尖振动测量方法获取叶片振动位移信号,采用基于统计特征的发动机风扇外物撞击检测方法对叶尖振动位移数据进行分析,获取风扇转子不同转速下的外物撞击阈值,并利用外物撞击数据及高速摄像系统对所建立方法的识别准确性进行验证。

## 2 发动机风扇外物撞击试验系统

### 2.1 风扇叶片外物撞击模拟试验平台

风扇叶片外物撞击试验平台用来模拟发动机叶片受到外物撞击的实际过程。图1为风扇叶片外物撞击模拟试验平台,该试验平台的风扇转子为整体叶盘式结构,单级12个叶片,叶尖直径600mm。叶片进口轮毂比0.667,盘厚度为50mm,设计最大转速6000r/min,设计压比1.06,设计效率0.84,设计流量9.5kg/s。

图2为外物撞击试验过程中所选用的外物弹体,该弹体为塑料材质的标准球体,尺寸分别为12mm,14mm,16mm,18mm,20mm,24mm。

### 2.2 非接触叶尖振动测量系统及原理

发动机风扇外物撞击检测识别技术是将非接触



Fig. 1 Fan blade foreign object impact test platform

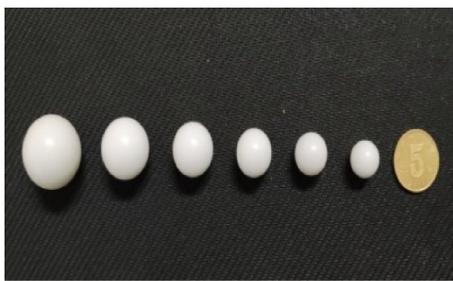


Fig. 2 Foreign projectile bodies

式叶尖振动传感器布置在风扇转子的机匣上,采用基于叶尖定时原理的方法来获取叶尖振动位移信号。非接触叶尖振动测量系统示意图如图3所示。

当外物撞击风扇叶片时,会对叶片施加一个冲击作用,该冲击作用会强迫高速旋转的叶片产生瞬态振动,瞬态振动会使叶片旋转瞬时角速度发生微小波动,从而使被撞击叶片到达传感器位置时,时刻出现偏差,通过对比到达时刻偏差或叶尖振动从而识别出叶片是否遭遇外物撞击事件。由于非接触式叶尖振动传感器不破坏转子结构,改装难度较小,对到达时刻偏差和叶尖振动响应灵敏度高等优点,成为检测识别发动机风扇外物撞击的主要选择<sup>[15-16]</sup>。

叶尖定时算法直接影响叶片振动位移等参数辨识的准确性,由叶尖定时测振原理可知,传感器安装

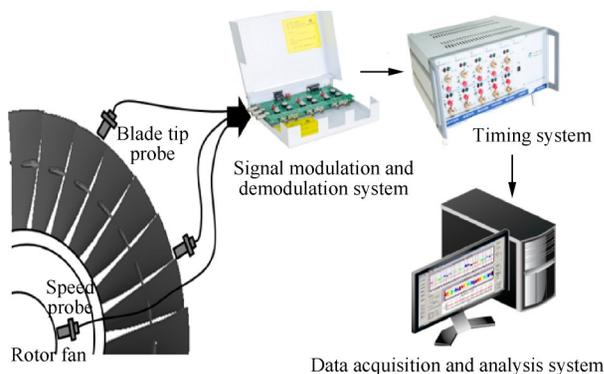


Fig. 3 Non-contact blade tip vibration measuring system

角 $\alpha_i$ 和叶片振动倍频 $N_e$ 共同决定传感器对振动信号的采样点位置,无论传感器安装角和振动倍频多大,均可将 $N_e \times \alpha_i$ 规整到一个振动周期 $[0^\circ, 360^\circ)$ 内,从而得到所有传感器在振动圆周内采样点的分布角,通过分布角的优化分析可获取最优的传感器布置方式。以非接触叶尖振动位移传感器风扇机匣布置优化算法得到四支叶尖振动位移传感器的最佳布置位置,图4为叶尖振动传感器沿机匣轴向的布置示意图,以 $S_0$ 为基准,逆时针夹角分别为 $0^\circ, 127^\circ, 238^\circ, 319^\circ$ 。对试验平台进行非接触叶尖振动位移测量系统测试改装,使其达到风扇外物撞击试验的基本要求。

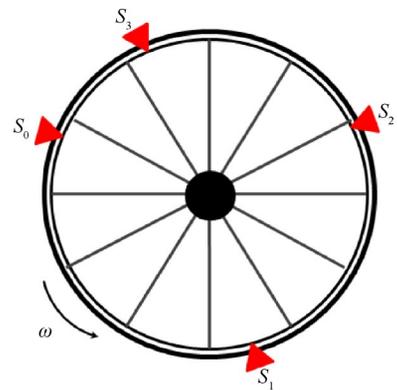


Fig. 4 Circumferential layout diagram of non-contact vibration sensors

本文通过非接触叶尖振动测量的方法,对风扇转子叶片进行实时叶尖振动位移测量,通过对转子叶尖振动位移的实时监测与辨识解决了风扇转子外物撞击识别困难的问题;对风扇转子所有叶片进行编号(1~12#),在风扇转子工作过程中获取不同传感器( $S_0 \sim S_3$ )的叶尖振动位移信号,图5为相同传感器采集的叶尖振动位移随叶片不同的变化趋势,振动位移监测信号通道与叶片编号一一对应,通过对不同叶片叶尖振动位移信号的变化规律研究来识别外物撞击事件。

### 2.3 高速摄像系统

在风扇叶片外物撞击试验过程中,需建立一种标准的测量方式对外物撞击叶片及撞击位置进行识别,作为衡量非接触式叶尖振动测量系统对于发生撞击叶片的识别准确率的标准,图6为高速相机,该高速相机自带实时采集系统和处理软件。

通过调节高速相机的成像尺寸、曝光时间、帧数及光照条件等参数,使相机的成像质量最优,最终确定高速相机的单次采集时间。对风扇转子叶片进行

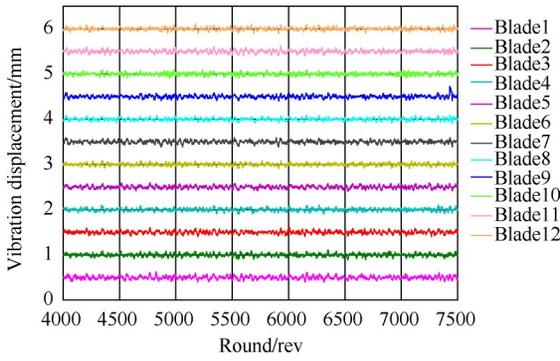


Fig. 5 Vibration displacement of  $S_0$  sensor at 4000r/min

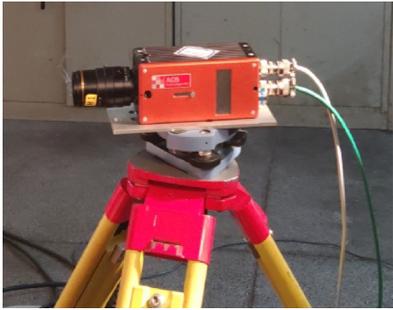


Fig. 6 High-speed camera system

沿逆时针1~12#编号,以高速相机采集工作状态的叶片及叶盘,图7为风扇转子在4000r/min时,高速相机成像尺寸900×700、曝光50μs、帧数2000 fps时,高速相机所采集到叶片及叶盘的图片。通过分析发现,风扇转子的叶片、叶盘及叶片编号清晰可见,满足风扇叶片外物撞击试验的要求。

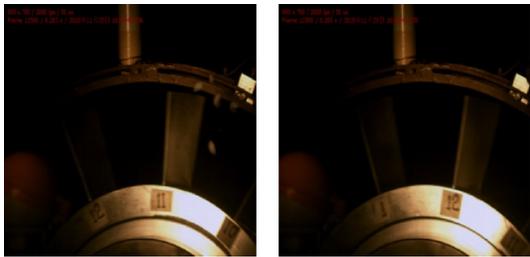


Fig. 7 Image captured by a high-speed camera at 4000r/min of fan

### 3 风扇非接触叶尖振动位移分析

#### 3.1 风扇发叶片非接触振动位移测量

发动机风扇叶片发生外物撞击事件时,会出现叶片振动的突增现象,由前文分析可知,风扇叶片叶尖的振动位移是其最佳检测信号。

获取风扇转子外物未撞击的稳定状态下典型转速的叶尖振动位移,通过数理统计及分析研究其规律。图8为风扇转子4000r/min时,无外物撞击的稳

定状态下的1#叶片的传感器  $S_0 \sim S_3$  非接触叶尖振动位移分布。

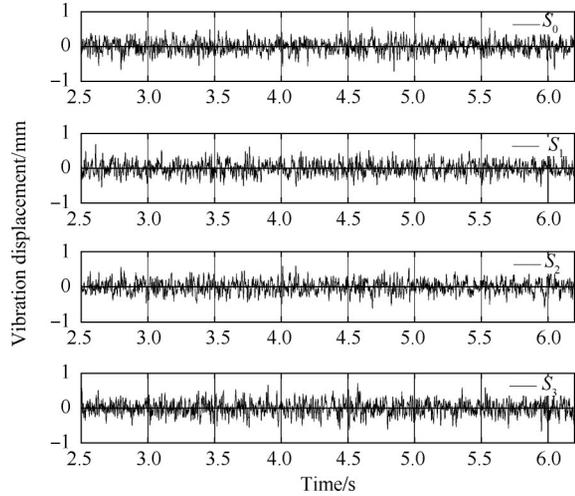


Fig. 8 Vibration displacement of 1# blade tip at 4000r/min

#### 3.2 叶尖振动位移信号统计特征分析

对风扇转子在4000r/min的1#叶片的  $S_0 \sim S_3$  传感器非接触叶尖振动位移进行数理统计分析,得到如图9所示的  $S_3$  非接触叶尖振动位移频率直方图分布,横坐标为该转速下的叶尖振动位移,纵坐标表示对应叶尖振动位移区间出现的频数分布,通过分析发现,  $S_3$  传感器的非接触叶尖振动位移近似服从正态分布。图10为  $S_3$  传感器非接触叶尖振动位移数据的  $Q-Q$ (分位数-分位数)图,非接触振动位移数据分布于标准正态分布周围,证明该叶片的非接触叶尖振动位移数据服从正态分布。

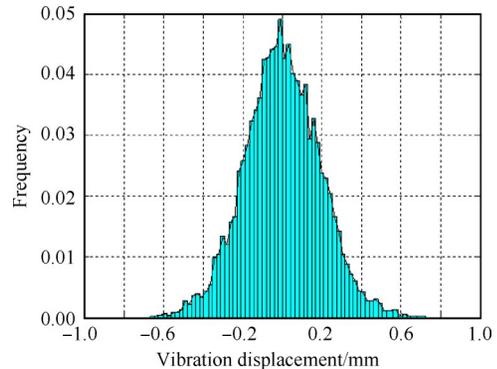


Fig. 9 Histogram distribution of blade tip vibration displacement frequency of  $S_3$  sensor

为确认非接触叶尖振动位移数据服从正态分布,采用Epps-Pulley检验对其非接触叶尖振动位移数据进行判断。Epps-Pulley检验利用样本的特征函数与正态分布特征函数的差的模的平方产生的一个

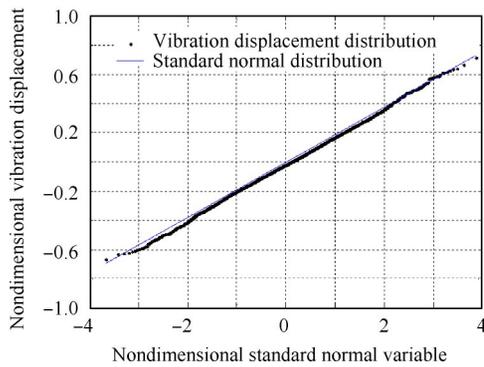


Fig. 10 Q-Q diagram of blade tip vibration displacement of  $S_3$  sensor

加权积分,由  $n$  个观察值  $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$ ,可计算以下列向量,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (1)$$

$$m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (2)$$

检验统计量为

$$T_{E \cdot p} = 1 + \frac{n}{\sqrt{3}} + \frac{2}{n} \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \exp\left\{-\frac{(x_j - x_i)^2}{2m}\right\} - \sqrt{2} \sum_{j=1}^n \exp\left\{-\frac{(x_j - \bar{x})^2}{4m}\right\} \quad (3)$$

如果计算出的检验统计量  $T_{E \cdot p}$  的值大于给定的显著性水平  $\alpha$  和样本量  $n$  确定的  $p$  分位数,则拒绝零假设,否则接受零假设。

通过 Epps-Pulley 假设检验,风扇转子在不同转速状态下,传感器  $S_0 \sim S_3$  采集到的叶尖振动位移数据均服从正态分布。

### 3.3 基于统计特征的风扇外物撞击检测方法

设风扇叶片的非接触叶尖振动位移服从正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ ,则对于振动位移  $x_{dis}$  任意测量值  $x$ ,其值落在  $\mu \pm 3\sigma$  内的概率为 99.74%。当外物撞击风扇叶片时,其叶尖振动位移值会产生突变,且振动位移  $x_{dis}$  远大于  $\mu + 3\sigma$  或远小于  $\mu - 3\sigma$ ,由此可以检测出外物撞击风扇叶片事件<sup>[17-18]</sup>。

对于任意的  $0 < \alpha_0 < 1$ ,可确定上  $\alpha_0$  的分位数  $z_0$ ,在检测过程中将其记作  $C$ 。当待检验叶尖振动位移  $x_{dis}$  满足式(5)时,判定风扇外物撞击事件发生,否则认为该风扇转子未发生外物撞击事件。

$$z_0 = \inf\{x: 1 - F(x) \geq \alpha\} \quad (4)$$

$$x > \mu + C \cdot \sigma \text{ 或 } x < \mu - C \cdot \sigma \quad (5)$$

对于该问题,正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$  中的  $\mu$  和  $\sigma$  均未知,需对其进行区间估计。

对于均值估计,  $\bar{x}$  是  $\mu$  的无偏估计,以样本标准差  $S$  代替总体均方差  $\sigma$ ,选取枢轴量

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \sim t(n-1) \quad (6)$$

对于给定的数  $\alpha_1$ ,由概率公式

$$P(|T| < t_{\frac{\alpha_1}{2}}(n-1)) = 1 - \alpha_1 \quad (7)$$

获取  $\mu$  置信度为  $1 - \alpha_1$  的置信区间  $(\mu_{down}, \mu_{up})$  为

$$\left(\bar{X} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha_1}{2}}(n-1), \bar{X} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha_1}{2}}(n-1)\right) \quad (8)$$

其中

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (9)$$

式中  $S^2$  是  $\sigma^2$  的无偏估计。

对于方差估计,选取枢轴量

$$\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1) \quad (10)$$

对于给定的  $\alpha_2$ ,取  $\chi^2$  的分布分位点  $\chi_{\frac{\alpha_2}{2}}^2(n)$  和

$\chi_{1-\frac{\alpha_2}{2}}^2(n)$ ,使其概率

$$P(\chi_{1-\frac{\alpha_2}{2}}^2(n-1) < \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} < \chi_{\frac{\alpha_2}{2}}^2(n-1)) = 1 - \alpha_2 \quad (11)$$

从而得到  $\sigma^2$  的置信度为  $1 - \alpha_2$  的置信区间  $(\sigma_{down}^2, \sigma_{up}^2)$  为

$$\left(\frac{(n-1)S^2}{\chi_{\frac{\alpha_2}{2}}^2(n-1)}, \frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\frac{\alpha_2}{2}}^2(n-1)}\right) \quad (12)$$

航空发动机风扇叶片外物撞击事件属于小概率事件,对于显著性水平,设置非接触叶尖振动位移的检测门限为  $x_{door}$ ,当  $|x| > x_{door}$  时,发出外物撞击风扇叶片告警信号,通过调整  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  等参数,可降低发动机风扇叶片外物撞击实时检测报警的虚警率。

$$x_{door} = \mu_{up} \pm C \cdot \sigma_{up} \quad (13)$$

### 3.4 风扇外物撞击自动门限在线检测

不同发动机风扇转子稳态时,非接触叶尖振动位移  $x_{dis}$  不同;同一风扇转子在不同转速下,叶尖振动位移相差也很大,因此不能使用固定的门限值对叶尖振动位移进行检测,采用如图 11 所示的随风扇转子状态改变而变化的自动门限在线检测系统。

自动检测门限  $x_{door}$  由风扇转子稳态时叶尖振动  $\mu, \sigma$  的估计和门限系数  $C$  两部分组成。为消除不同发动机风扇或不同工作转速的影响,在稳态时,接通“稳态样本选通”环节,估计  $\mu$  和  $\sigma$ ,并计算检测门限

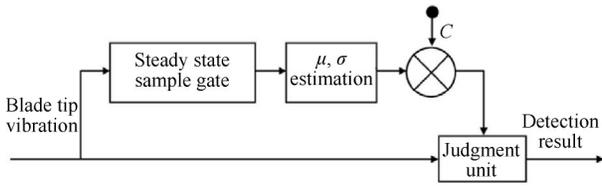


Fig. 11 Automatic threshold of FOD-detecting on-line

$x_{door}$ 。当外物撞击发动机风扇叶片时,“稳态样本选通”环节断开,振动位移参数判决器比较待检  $x_{dis}$  和门限  $x_{door}$ ,进而得到在线检测的结果。

针对发动机风扇转子稳态的过程,非接触叶尖振动位移服从正态分布,对其进行正态总体均值的区间估计。取  $\alpha_1=0.001, \alpha_2=0.001, \alpha_0=0.001$ ,得到其门限系数  $C=3.8906$ ,即叶尖振动位移落在置信区间之外的概率不足 0.1%,可认为叶尖振动位移不在该置信区间之外取值。

采用基于非接触叶尖振动位移的统计特征方法对该风扇转子不同转速下的叶尖振动数据进行统计分析,得到如图 12 所示的风扇转子不同转速下传感器  $S_0 \sim S_3$  的非接触叶尖振动位移置信区间分布,获取风扇转子不同转速下外物撞击叶尖振动检测阈值。

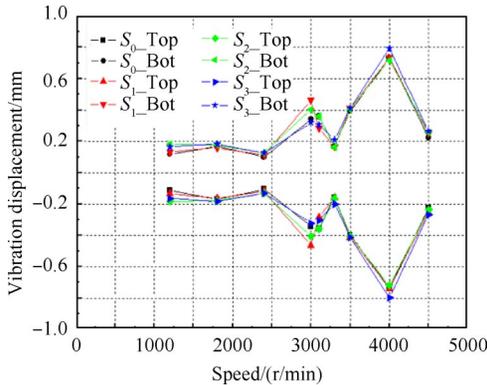


Fig. 12 Displacement threshold of foreign object impact vibration of fan at different rotational speeds

3.5 风扇外物撞击检测结果分析

在风扇叶片外物撞击试验之前,将非接触叶尖振动测量系统与高速摄像系统的时间进行统一。对风扇转子转速为 3000r/min 状态下,直径为 16mm、质量为 2.9g 的外物弹体撞击风扇叶片振动位移数据进行分析,在该试验过程中连续发射 5 颗外物弹体撞击叶片相同位置,非接触式叶尖振动监测系统监测到 5 次叶片振动突增现象,按出现顺序分别为 9#, 7#, 9#, 10#, 7# 叶片,并采用高速摄像系统对外物撞击过程进行了详细记录。

图 13 为风扇转子 7# 叶片的非接触叶尖振动位移

随时间分布,采用基于非接触叶尖振动位移统计特征方法得到该转速下不同传感器的外物撞击振动位移阈值分布,对其振动位移进行在线检测,在  $S_0$  传感器振动位移中检测到两次叶尖振动位移均超过判定阈值。

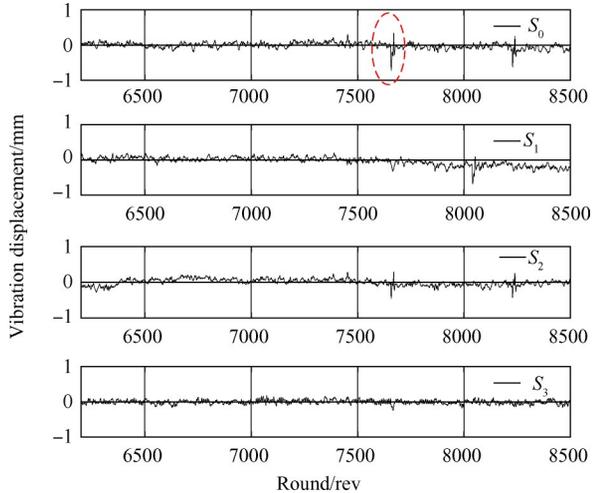


Fig. 13 Tip vibration displacement distribution of fan rotor 7# blade

图 14 为高速摄像系统拍摄到的外物撞击风扇叶片过程,该过程发生于 7# 叶片,且撞击时刻与采用基于叶尖振动位移统计特征方法判定的第一次撞击 7# 叶片的时刻相吻合。高速摄像系统与非接触叶尖振动测量系统验证了基于叶尖振动位移统计特征方法的外物撞击在线检测方法的正确性和可靠性。

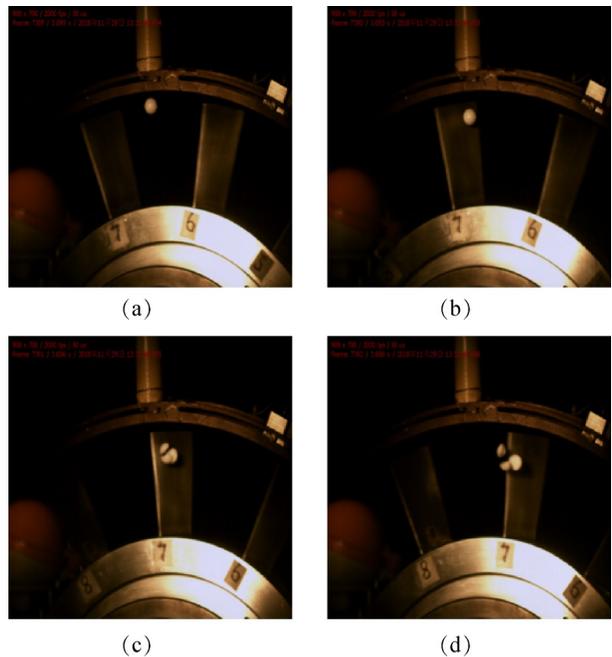


Fig. 14 Process of foreign projectile bodies with the diameter of 16mm impacting the fan blade at the speed of 3000r/min

## 4 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)针对航空发动机参数与加装振动传感器对风扇外物撞击事件识别难度高及识别准确率低的问题,提出了采用非接触叶尖振动测量系统对风扇叶片叶尖振动位移进行测量的方法,并实现了基于叶尖振动位移分析的风扇外物撞击检测与识别。

(2)采用基于统计特征的风扇叶片外物撞击叶尖振动位移检测算法,获取了风扇转子不同转速下、不同传感器在给定置信水平下的外物撞击叶尖振动位移检测阈值。

(3)通过对高速摄像系统拍摄风扇转子不同转速状态及不同外物尺寸的撞击瞬间过程分析,该风扇外物撞击检测方法对外物撞击事件、叶片编号等具有较高的识别准确率。

(4)由于外物发射后撞击叶片位置的随机性,该方法不能依据其检测结果判断出外物撞击在风扇叶片上的具体位置;且当外物撞击在叶片前缘时,叶片在周向上振动位移没有明显的增加,这使得该方法难以识别此种外物撞击事件。

在后续研究中,将以高速摄像系统为判断依据,研究风扇叶片外物撞击后的非接触叶尖振动测量系统的外物撞击识别响应时间规律,并对该非接触测量系统提出改进优化建议。

**致 谢:**感谢航空工业联合基金、航空科学基金项目的资助。

## 参考文献

- [ 1 ] 杨 杰. 风扇叶片鸟撞击响应及受损风扇起动性能分析方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [ 2 ] 陈贺贺. 飞机风挡鸟撞数值模拟研究[D]. 太原:中北大学, 2018.
- [ 3 ] 王维民. 燃气轮机叶片状态监测技术及故障诊断研究[D]. 北京:北京化工大学, 2014.
- [ 4 ] Shioya T, Stronge W J. A Study on Foreign Object Damage of Rotating Fan Blades[M]. *Japan: Springer*, 1987.
- [ 5 ] Seyed M M, Khosrow R, Mehdi T. Foreign Object Damage on the Leading Edge of Compressor Blades [J]. *Transactions of FAMENA*, 2013, 37(2): 57-66.
- [ 6 ] Cardwell D N, Chana K S, Gilboy M T. The Development and Testing of a Gas Turbine Engine Foreign Object Damage (FOD) Detection System [C]. *Glasgow: Proceedings of ASME Turbo Expo 2010*, 2010.
- [ 7 ] 慕琴琴, 黄文超, 燕 群, 等. 旋转离心应力对叶片鸟撞响应的影响[J]. *航空计算技术*, 2014, 44(6): 55-59.
- [ 8 ] 尹冬梅, 钱林方, 栗保明, 等. 外物形状对发动机叶片中残余应力场的影响分析[J]. *机械强度*, 2012, 34(3): 355-360.
- [ 9 ] 尹冬梅, 钱林方, 徐亚栋, 等. 叶片砂石撞击损伤的数值模拟与分析[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2008, (5): 536-539.
- [ 10 ] 刘 超. 叶片外物损伤模拟及其疲劳强度预测技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
- [ 11 ] 潘 辉. 叶片外物损伤的特征分析及模拟试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [ 12 ] 季玉辉. 基于Johnson-Cook模型的硬物损伤数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
- [ 13 ] Guan Yupu, Zhao Zhenhua, Chen Wei, et al. Foreign Object Damage to Fan Rotor Blades of Aeroengine, Part I: Experimental Study of Bird Impact[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(5): 408-414.
- [ 14 ] Guan Yupu, Zhao Zhenhua, Chen Wei, et al. Foreign Object Damage to Fan Rotor Blades of Aeroengine, Part II: Numerical Simulation of Bird Impact [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21(4): 328-334.
- [ 15 ] 刘志博. 基于叶尖定时的叶片振动参数辨识及耦合振动研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- [ 16 ] 刘美茹, 朱 靖, 滕光蓉, 等. 非接触旋转叶片振动测量系统在转子叶片裂纹故障试验中的应用[J]. *燃气涡轮与试验*, 2015, 28(2): 45-50.
- [ 17 ] 王 岩, 隋思涟. 数理统计与MATLAB数据分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2014.
- [ 18 ] 金 光. 数据分析与建模方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.

(编辑:朱立影)