

风扇叶片外物撞击监测识别试验

雷晓波¹, 董彦非¹, 王茜²

(1. 西安航空学院飞行器学院, 西安, 710077; 2. 中国飞行试验研究院, 西安, 710089)

摘要 为开展基于非接触叶尖振动测量的风扇叶片外物撞击监测识别技术研究,设计搭建了风扇叶片外物撞击监测识别试验平台,开展了不同弹体质量、发射速度、风扇转速等工况下的外物撞击试验。利用高速摄像机对外物撞击识别结果进行了检验,初步给出了外物撞击判定准则。分析了不同弹体质量、转速条件下系统识别准确率的差异,以及不同撞击因素与叶尖振动之间的定性规律。分析得出:外物撞击监测识别系统能够准确识别出撞击事件以及撞击叶片编号;风扇转速在1 800~4 000 r/min范围内,当弹体质量大于2.90 g时,系统的识别准确率达到100%,这为后续建立外物撞击智能监测识别方法提供了重要的试验数据和依据。

关键词 外物撞击识别;叶尖振动测量;风扇叶片;识别准确率;撞击规律

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.03.004

中图分类号 V231.92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)03-0023-06

Detection and Identification Test of an Impact on Fan Blade by Foreign Object

LEI Xiaobo¹, DONG Yanfei¹, WANG Qian²

(1. School of Aircraft, Xi'an Aeronautical, Xi'an 710077, China; 2. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract In order to study the detection and identification technology of foreign object impact on fan blade at noninterference blade tip vibration measurement, a fan blade test platform for detection and identification of foreign object impact is designed and built. Lots of experiments are carried out under different working conditions such as projectile mass, launching speed and fan speed. The criterion of foreign object impact identification is preliminarily given before the identification results are verified at high speed camera. The difference of the recognition accuracy under different projectile mass and rotating speed conditions, and qualitative rule between impact factors and blade tip vibration is analyzed. The result shows that the detection and identification system could accurately determine the impact event with the number of impact blade. The identification accuracy of the system reaches 100% under conditions of fan speed within the range of 1800~4000 r/min, and the mass of the projectile is greater than 2.90 g. The above mentioned provides important test data and basis for establishing intelligent detection and identification methods for foreign object impact.

Key words foreign object impact identification; blade-tip vibration measurement; fan blade; identification accuracy; impact rule

收稿日期: 2020-07-01

基金项目: 中航工业联合基金项目(风扇叶片外物撞击飞行监测与评估技术研究 6141B05110404)

作者简介: 雷晓波(1986—),男,陕西合阳人,高级工程师,硕士,研究方向:航空发动机状态监测与故障诊断、结构可靠性分析。
E-mail:627983062@qq.com

引用格式: 雷晓波, 董彦非, 王茜. 风扇叶片外物撞击监测识别试验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(3): 23-28. LEI Xiaobo, DONG Yanfei, WANG Qian. Foreign Object Impact Detection and Identification Test of Fan Blade by Foreign Object[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(3): 23-28.

沙尘、石块、飞鸟、金属碎片、冰块等物体吸入发动机流道,会对风扇/压气机叶片产生各类损伤,外物损伤(简称 FOD)会造成叶片产生不同程度的结构损伤,或者造成发动机性能衰退,极端情况下可造成灾难性飞行事故。据美军统计,1991—2004 年间鸟撞事件多达 517 起,鸟撞是运输类飞机的第一重大事故症候^[1-2],我国空军对 1 135 台次发动机进行调研表明:30%左右的翻修压气机叶片属于打伤性质^[3]。外物撞击风扇叶片愈发频繁,如何能够及时识别外物撞击事件,对于飞行员采取合理的处置措施,避免或减轻飞行事故,为维修维护人员快速定位被撞叶片编号,提高维修效率都具有重要的作战意义^[4-5]。近些年,由于非接触叶尖振动测量技术的成熟化,英美两国在发动机上加装叶尖振动测量系统开展叶片结构健康状态的监测分析^[6-7]。风扇叶片外物撞击监测识别技术是将非接触叶尖定时传感器布置在发动机风扇机匣上,实时测量叶尖振动离散波形。当风扇叶片遭遇外物撞击时,撞击强迫高速旋转的叶片产生瞬态振动,造成叶片瞬时角速度发生波动,从而使被撞叶片转到传感器位置的时刻出现偏差,通过对比到达时刻偏差或叶尖振动变化,从而识别出叶片是否遭遇外物撞击事件。

目前国内外关于发动机外物撞击的研究主要集中在风扇叶片鸟撞瞬态响应研究、鸟撞静止叶片的模拟试验研究上^[3-4],关于叶片外物撞击监测识别技术的研究较少。文献^[6]表明:英国 QinetiQ 公司开展了大量的叶片外物撞击理论及试验研究,研制了一套叶片外物撞击监测识别报警系统,并于 2008 年在 RB168-101 发动机上验证了系统功能,结果表明该监测报警系统能够在发动机满转速下监测出 1 g 外物撞击事件。我国在叶片外物撞击监测识别技术研究还处在空白阶段。由于叶片外物撞击监测识别技术在保障飞行安全以及叶轮机械健康运转方面具有重要的价值,因此有必要开展叶片外物撞击监测识别试验,通过大量试验分析建立叶片外物撞击监测识别方法。

1 风扇叶片外物撞击试验平台

1.1 风扇转子试验平台

如图 1 所示,风扇叶片外物撞击试验平台由风扇转子试验器、外物发射装置、转子状态监控系统、试验安全防护装置等部分组成。从试验安全角度考虑,采用“试验现场与操作控制现场隔离”的空间布局,即撞击试验过程中所有人员、监控终端、测试系统工控机位于安全系数足够高的封闭区域,而转子

试验器位于另一隔离区,试验平台布局见图 2。

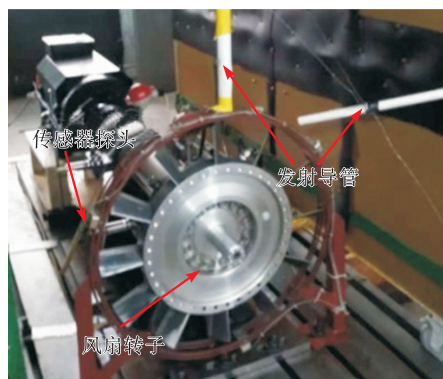


图 1 风扇叶片外物撞击试验平台

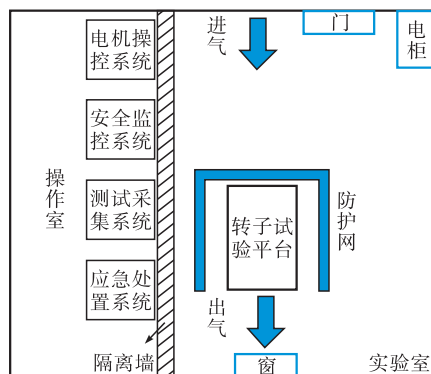


图 2 试验设备总体布局示意图

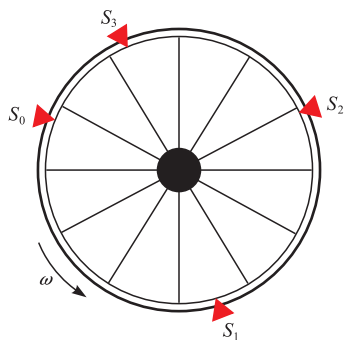
以某发动机风扇转子为设计参考,采用动力学相似原理模拟低压转子部件的动力学特性,采用整体叶盘设计理念,风扇叶片数量为 12,叶高 10 cm,叶轮旋转直径为 600 mm,叶盘厚度 50 mm;设计压比 1.06,设计效率 0.84,设计流量 9.5 kg/s,实际最高转速为 4 400 r/min;转子结构采用“双支撑+盘悬臂”布局,考虑到风扇旋转过程对轴系产生向前的推力,前轴承选用深沟球轴承,后轴承选取圆柱滚子轴承;采用独立滑油泵对轴承进行喷射润滑,采用“封严锯齿结构+回油槽”对轴承座轴向端面进行封严。

1.2 叶片外物撞击识别系统

为验证叶片外物撞击监测识别技术的准确性,采用高速摄像拍摄撞击画面,分析外物撞击事件是否发生、撞击叶片编号及撞击位置等撞击信息。叶片外物撞击识别系统由 1 个安装在转轴光滑段的转速传感器,见图 3(a);4 个安装在风扇旋转平台的叶尖定时传感器,见图 3(b);叶尖定时数据采集处理器组成。其中转速传感器采集的转速相位信号为识别叶片编号提供了基准参考。根据叶尖定时传感器布置算法,确定叶尖定时传感器的周向角度,其中将任一传感器定义为 S_0 ,沿着旋转方向 4 个叶尖定时传感器 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 与 S_0 的夹角分别为 0° 、 127° 、 238° 和 319° 。



(a) 转速传感器



(b) 叶尖定时传感器分布位置示意图

图 3 叶片外物撞击识别系统传感器

2 风扇叶片外物撞击试验

由于叶尖振动受转速波动、气流激振等因素影响较大,为较全面研究风扇叶片外物撞击监测识别技术的准确性,研究团队在转速稳定状态、加减速状态和转速波动状态下开展了近千次的外物撞击试验。鉴于篇幅限制,本文只介绍转速稳定状态下的外物撞击识别试验。试验时,首先采集转速稳定状态下未撞击时叶尖振动波形,然后从图 1 中白色导管释放不同质量、速度的塑料弹体撞击叶片,其中弹体质量参考文献[6]中的试验分组,再根据前期平板叶片静态撞击试验结果来确定。同时拍摄撞击画面,采集叶尖振动波形,在外物撞击过程中需密切关注转子支座振动以及视频监控画面,如出现异常则采取应急处置措施。

2.1 叶片外物撞击判定准则

由于叶尖振动测量系统的不稳定性、不同角度叶尖定时传感器的灵敏度差异大,外物撞击叶片过程中叶尖振动波形呈现出复杂的变化规律^[6],不同传感器之间的响应差异很大,为此需要综合多个传感器的结果以提高识别准确率。通过分析大量的监控数据,基于单只传感器信号的外物撞击判定准则如下:转速稳定状态下叶尖振动幅值变化量 ≥ 0.6 mm(由于监控需要,转速稳定状态下真实叶尖振动幅值为监控画面上振动幅值的 1/2,下文如无特殊

说明,则振动幅值指监控画面上的振动幅值),则判定该叶片遭遇撞击;另一方面,为避免误判,需要将 4 个传感器的判别结果综合,最终给出某叶片遭遇撞击的准则为:至少 2 个传感器证明该叶片遭遇撞击,才可最终认定该叶片遭遇撞击。

2.2 风扇转速为 3 000 r/min 时的外物撞击试验

图 4 为风扇转速 3 000 r/min 时,发射 5 颗质量 2.90 g 的塑料球撞击风扇叶片过程中,传感器 S_0 采集的实时监控界面, S_0 传感器捕捉到了 5 次明显的叶片振动异常,第 1 次振动异常发生在 B_9 叶片,第 2 次振动异常发生在 B_7 叶片,第 3 次振动异常发生在 B_9 叶片,第 4 次振动异常发生在 B_{10} 、 B_{12} 2 个叶片,第 5 次振动异常发生在 B_7 叶片。

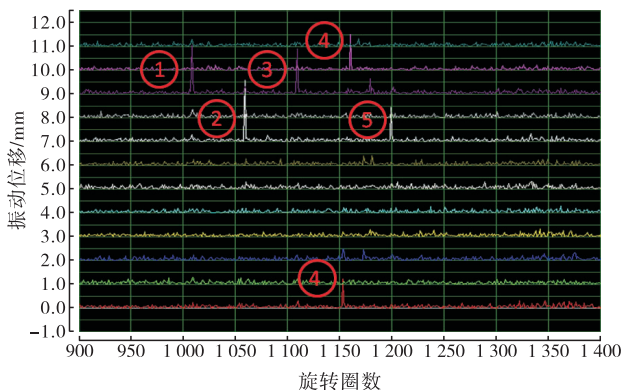


图 4 风扇转速 3 000 r/min、2.90 g 弹体撞击叶片时 S_0 传感器监测画面

图 5 为同一试验条件下 S_1 采集的实时监控画面,对比 S_0 传感器采集的叶尖振动,可以看出撞击时叶尖振动的幅值变化要小于 S_0 传感器,由于第 4 次撞击过程中 B_{10} 叶尖振动变化很小,故第 4 次撞击过程中 S_1 只识别出了 B_{12} 遭遇外物撞击,而 B_{10} 被判定为未遭遇外物撞击。

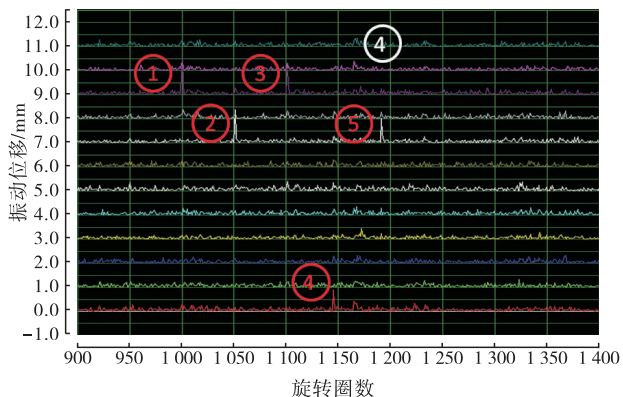


图 5 风扇转速 3 000 r/min、2.90 g 弹体撞击叶片时 S_1 传感器监测画面

同理,图 6 为该转速下 S_2 传感器采集的实时监控画面,由于第 4 次撞击过程中 B_{12} 叶尖振动幅值变化未达到 0.6 mm,因此第 4 次撞击过程中 S_1 只能判

定 B_{10} 遭遇外物撞击。同理,图 7 为该转速下 S_3 传感器采集的实时监控画面,容易看出,该传感器未识别出第 2 次撞击,且在第 4 次撞击过程中只有 B_{10} 叶片振动出现异常增大,只能判定 B_{10} 叶片遭遇外物撞击。

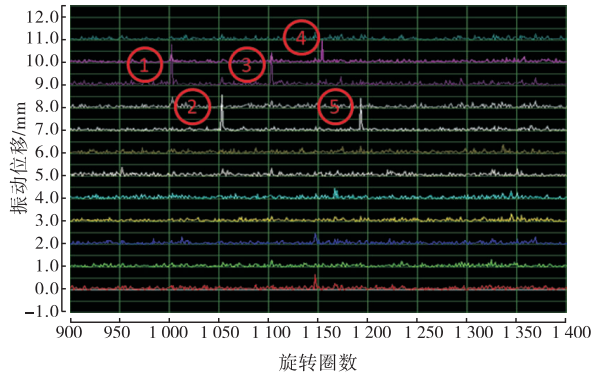


图 6 风扇转速 3 000 r/min、2.90 g 弹体撞击叶片时 S_2 传感器监测画面

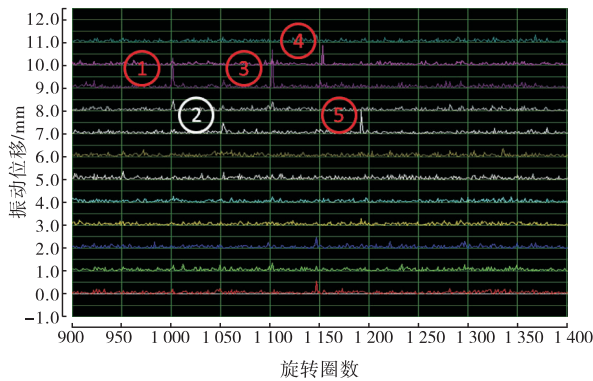


图 7 风扇转速 3 000 r/min、2.90 g 弹体撞击叶片时 S_3 传感器监测画面

将 4 个传感器的识别结果整理成表 1,从表 1 可以看出 S_3 未识别出第 2 次撞击事件,这说明了不同传感器对不同的撞击事件识别结果不一致。从最终的撞击判定结果可以看出,第 1、2、3、5 叶片振动异常发生在单个叶片上,而第 4 次叶片异常振动则发生在 2 个叶片上。

表 1 风扇转速为 3 000 r/min 时外物撞击识别结果

识别结果	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
S_0	B_9	B_7	B_9	B_{10} 、 B_{12}	B_7
S_1	B_9	B_7	B_9	B_{12}	B_7
S_2	B_9	B_7	B_9	B_{10}	B_7
S_3	B_9	无	B_9	B_{10} 、 B_{12}	B_7
最终判别结果	B_9	B_7	B_9	B_{10} 、 B_{12}	B_7

以前 2 次撞击为例,图 8、图 9 分别给出了第 1、2 次外物撞击风扇叶片的高速摄像机画面,撞击时间见左下角标注,时间格式为分:秒:毫秒:帧序列。

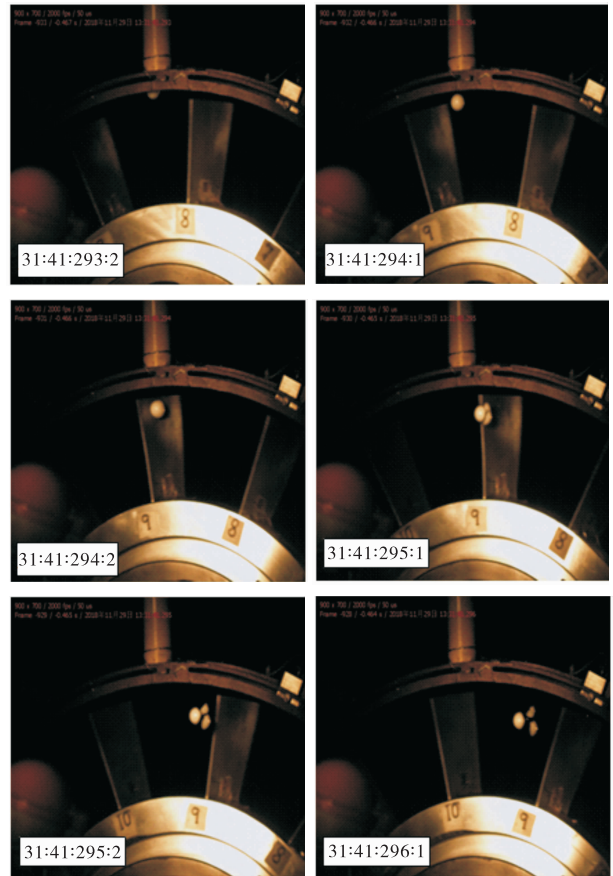


图 8 高速摄像机拍摄的第 1 次外物撞击画面

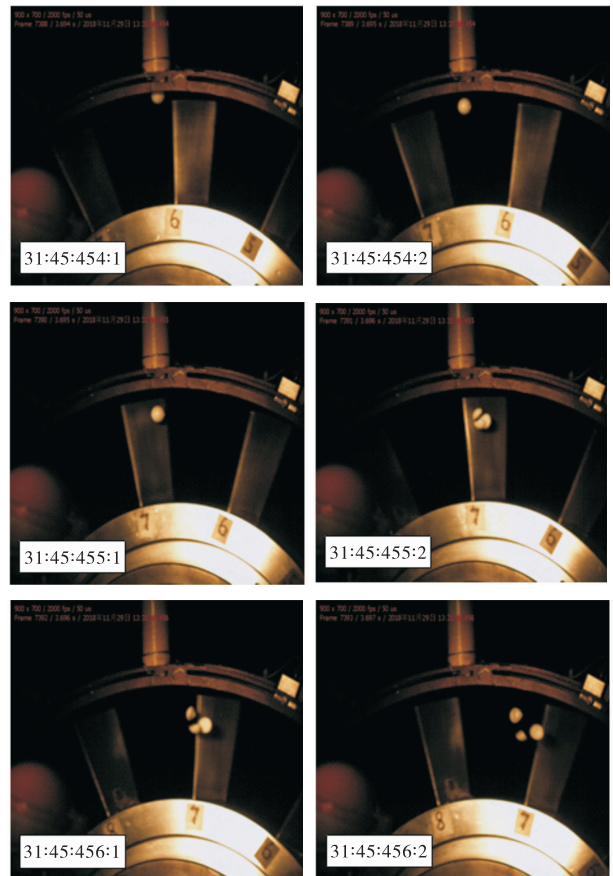


图 9 高速摄像机拍摄的第 2 次外物撞击画面在图 8 中白色塑料弹体撞击到 B_9 叶片的尾缘

处,弹体随即被撞碎后弹出,在图4中只有 B_9 叶片叶尖振动出现很大峰值, B_7 叶片、 B_8 叶片也出现较小的振动突尖,但由于增大的幅度与未撞击比没有明显差异,故排除这2个叶片被撞击的可能,这也是后续需要开展识别算法研究的必要性。在图9中白色塑料弹体撞击到 B_7 叶片,可以看出叶片瞬间有较大的弯曲变形,塑料弹体被撞碎后弹出。系统识别的第1、2次叶片撞击结果与高速相机捕捉到的叶片撞击编号完全吻合。

2.3 外物撞击试验数据统计与分析

转速稳定状态下共完成了582次外物撞击试验,其中有高速摄像机拍摄的外物撞击事件统计见表2。分析表2发现,风扇转速分别为1 800 r/min、2 400 r/min、3 000 r/min、3 600 r/min时,叶片外物撞击识别系统识别的1.25 g以及2.90 g的弹体撞击次数与高速相机捕捉的次数完全吻合。在风扇转速为4 000 r/min时,开展了4次1.25 g的外物撞击试验,系统只能监测到2次叶片振动异常,其他2次撞击事件未被识别出,即在该工况下系统识别准确率仅为50%。初步分析的原因可能为:风扇转速4 000 r/min时叶片基础振动增大,且其叶片动刚度增大,叶片的振动状态难以改变,质量1.25 g的外物与叶片相撞产生的动势能不足以使叶片产生较大的振动异常,加之受限于叶尖振动测量系统的测量精度以及噪声干扰,故对于1.25 g的外物撞击事件的识别准确率仅为50%。

表2 外物撞击识别系统识别/高速相机捕捉的统计

转速/(r/min)	1.25 g 弹体	2.90 g 弹体	4.12 g 弹体
1 800	5/5	14/14	—
2 400	—	12/12	—
3 000	—	30/30	—
3 600	—	20/20	—
4 000	2/4	10/10	10/10

从表2可知,转速跨度为1 800~4 000 r/min时,总共发射86颗2.90 g弹体,系统均能够识别出外物撞击事件,识别成功率达到100%。进一步分析得出,当风扇转子处在特定转速下,对于材质和形状确定的弹体,叶片外物撞击识别系统存在一可识别的最小质量。

3 不同撞击因素对叶尖振动的影响分析

根据试验结果,在转速、弹体质量、发射速度都相同的条件下,由于弹体撞击叶片编号、位置是一随机过程。试验发现,撞击叶片的位置不同,会造成撞击后叶尖振动的响应出现很大差异。为尽可能消除

撞击位置对其他撞击因素的干扰,下文采用平均值来评估撞击因素对叶尖振动的影响(下文图表、文中的叶尖振动数据都是实际数值的2倍)。

3.1 不同质量对叶尖振动的影响

在风扇转速为4 000 r/min的状态下,发射1.25 g、2.90 g以及4.12 g三种质量的弹体撞击叶片,统计的叶尖振动位移的均值见图10,可以看出随着弹体质量的增加,叶尖位移的增大呈快速增大趋势。

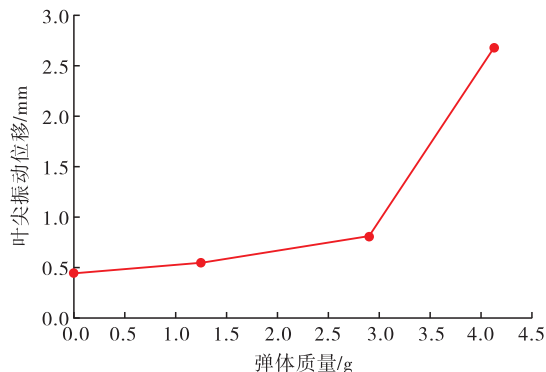


图10 4 000 r/min不同质量弹体引起的叶尖振动位移曲线

3.2 不同撞击速度对叶尖振动的影响

在风扇转速为3 600 r/min的状态下,发射2.90 g的塑料弹体以3~5 m/s、8~10 m/s的发射速度撞击叶片,多次撞击造成的叶尖振动位移幅值曲线见图11,可以看出即使所有变量相同,不同撞击序列之间叶尖振动幅值也存在很大差异,其中大速度撞击造成的叶尖振动位移均值为1.93 mm,小速度撞击造成的叶尖振动位移均值为1.18 mm,总体来看,大速度撞击造成的叶尖振动幅值大于小速度撞击造成的振动位移幅值。

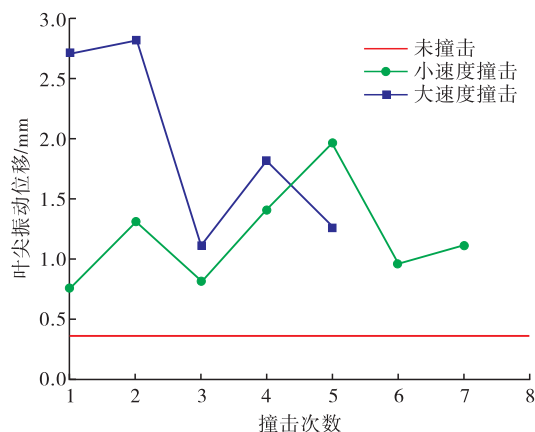


图11 不同发射速度对应的叶尖振动位移曲线

3.3 不同转速对叶尖振动的影响

图12给出了在1 800~4 000 r/min转速范围内发射2.90 g塑料弹体,撞击叶片瞬间叶尖振动幅值的变化曲线。从图12可以看出,即使相同条件下

不同撞击序列引起的叶尖振动幅值也相差很大。为尽可能消除撞击位置这个不可控的因素,将同一转速下的撞击幅值进行均化,得出图 13 曲线图,可以看出,当弹体材质、质量和发射速度等撞击因素确定后,当转速超过某一值后,叶尖振动幅值将会出现明显的减小。

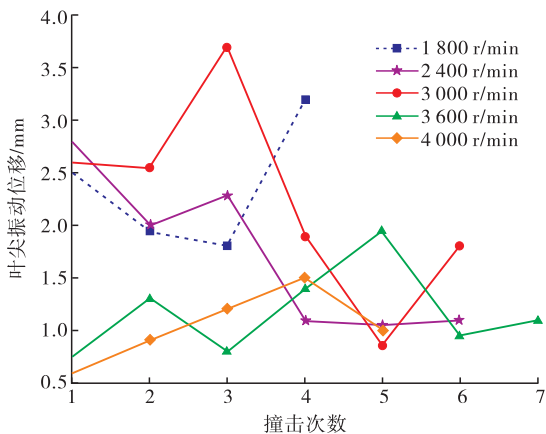


图 12 不同转速下叶尖振动位移变化曲线

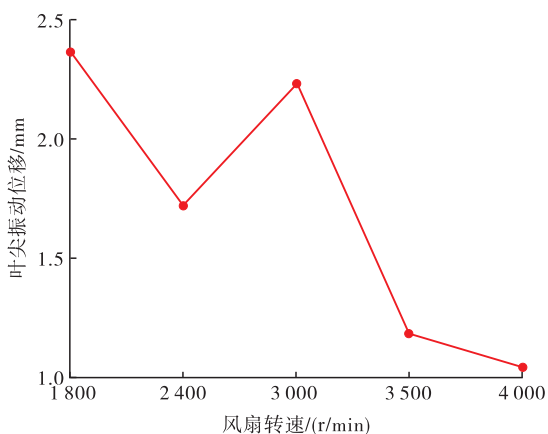


图 13 叶尖振动位移均值随风扇转速的变化曲线

4 结论

在风扇叶片外物撞击监测识别试验平台上,开展了转速稳定下的外物撞击试验,分析了外物撞击识别试验结果以及各撞击因素与叶尖振动之间的定性规律,得出:

1)对于一风扇转子而言,外物撞击识别系统存在一可识别的最小质量。

2)对于该风扇转子试验器,风扇转速在 1800~4000 r/min 范围内,当弹体质量大于 2.90 g 时,外物撞击识别系统的识别准确率达到 100%。

3)不同角度位置的叶尖定时传感器对于外物撞击的响应具有较大差异,因此为提高系统识别准确率,需要综合多个传感器的识别结果进行判定。

4)外物撞击位置对叶尖振动有很大影响,这是造成相同撞击条件下,不同撞击序列对应的叶尖振动幅值差异明显的主要原因。

本文中判定叶片是否撞击的准则较为粗略,为进一步提高识别准确率,后续需对不同转速下的试验数据进行统计分析,从而给出未撞击与撞击之间的判别门限值,以满足智能监测识别的需求。

参考文献

- [1] RITCHIE O, PETER J O. Foreign Object Damage and High Cycle Fatigue of Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering, 2001, 319(4): 597-601.
- [2] 关玉璞, 陈伟, 高德平. 航空发动机叶片外物损伤研究现状[J]. 航空学报, 2006, 28(4): 851-857.
- [3] 黄志勇, 陈伟, 赵海鸥. 评定叶片鸟撞击损伤的参数与方法[J]. 航空发动机, 2005, 31(1): 28-30.
- [4] SHMOTIN Y, CHUPIN P, GABO D, et al. Bird Strike Analysis of Aircraft Engine Fan[C]// 7th European LS - DYNA Conference. Vienna, Austria: IEEE, 2009: 64-67.
- [5] 胡伟, 王德友, 杜少辉, 等. 非接触式数字光纤叶片测振系统的研究及应用[J]. 航空发动机, 2010, 36(1): 38-41.
- [6] CARDWEL D N, CHANA K S, GILBOY M T. The Development and Testing of a Gas Turbine Engine Foreign Object Damage (FOD) Detection System [C]// ASME GT 2010. Glasgow, UK: ASME, 2010: 209-221.
- [7] VERCOUTTER A, LARDIED J, TALON A, et al. Improvement of Compressor Blade Vibrations Spectral Analysis from Tip Timing Data Aliasing Reduction [C]// ASME GT 2013. Texas, USA: ASME, 2013: 37-51.

(编辑:姚树峰)