

# 某型航空发动机振动监控改进研究

马力<sup>1</sup>, 孙涛<sup>2</sup>, 马同刚<sup>3</sup>

<sup>1</sup>海军装备部驻沈阳地区第二军事代表室, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台

<sup>3</sup>91899部队, 辽宁 葫芦岛

Email: happysuntao@163.com

收稿日期: 2020年10月5日; 录用日期: 2020年10月19日; 发布日期: 2020年10月26日

## 摘要

针对某型发动机振动问题, 从振动特征上入手, 存在两种振动特征: 慢车上推高状态过程的过渡态振动偏大和慢车上推到高状态稳定后的振动偏大。分析了外场振动形式, 结合当前发动机使用情况和相关类型整机振动特点, 对发动机振动特征进行总结分析。统计了发动机在整个翻修期内历次过渡态和稳态振动最大值, 以及典型发动机振动时间分布规律。最后, 结合上述分析与统计结果, 给出了某型发动机振动监控方案。所得振动标准为类似发动机的振动研究与故障排除起到应用参考作用。

## 关键词

发动机振动, 振动特点, 振动时间统计, 危害性分析, 优化方案分析

# Study on Improvement of Vibration Monitor for an Aero-Engine

Li Ma<sup>1</sup>, Tao Sun<sup>2</sup>, Tonggang Ma<sup>3</sup>

<sup>1</sup>The Second Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Shenyang, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>Academy of Aeronautical Foundation, Naval Aviation University, Yantai Shandong

<sup>3</sup>The Unit 91899 of Army, Huludao Liaoning

Email: happysuntao@163.com

Received: Oct. 5<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 19<sup>th</sup>, 2020; published: Oct. 26<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

In this paper, aiming at the vibration problem of a certain type of engine, two kinds of vibration characteristics were obtained from the vibration in the process of pushing up on the idle and the

文章引用: 马力, 孙涛, 马同刚. 某型航空发动机振动监控改进研究[J]. 机械工程与技术, 2020, 9(5): 470-480.

DOI: 10.12677/met.2020.95051

larger vibration in the steady state on the idle. The vibration form of outfield was analyzed, according to the current engine usage and the vibration characteristics of the whole engine. The maximum values of transient and steady-state vibration and the vibration time distribution of typical engines during the refurbishment period were calculated. Finally, combined with the above analysis and summary, the vibration monitor scheme of a certain type of engine was given. The vibration standards obtained plays an application reference role in the research and trouble shooting of similar engine vibration.

## Keywords

Engine Vibration, Vibration Characteristics, Vibration Time Statistics, Hazard Analysis, Optimization Scheme Analysis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

整机振动作为发动机重要的监控参数，其目的是为了监测发动机转子 - 支撑系统的结构状态，是发动机整机振动特性，加工、装配质量等方面的综合体现，是在长时间、大量台架发动机监测结果基础上，总结制定出来的，对保证飞行安全具有重要的意义[1] [2] [3] [4] [5]。

近年来，基于大数据平台的发动机振动正受到广泛关注，采取数学方法和手段[6] [7] [8]对其进行研究，但需要大量的数据，且要求数据精度高，研究结果真实可信，紧贴工程应用。文献[9]基于 D-S 证据理论对航空发动机振动故障进行分析，综合利用不同特征项下的分析结果，采用基于 D-S 证据理论的信息融合方法对不同特征下的 BP 神经网络的诊断结果进行融合，针对航空发动机实际工作情况提出一种利用神经网络的输出统计值构造信任函数的方法。文献[10]研究了监测对象的振动机理和主要特点，分析了进行振动监测的必要性和可能性，总结航空发动机的常见故障，确定了发动机振动监测系统的组成和主要功能。文献[11] [12] [13] [14]主要探索一种从庞杂数据中挖掘有效信息的方法。将粗糙集方法运用到发动机振动故障特征提取中，能够有效的提取出发动机故障特征。某型发动机外场整机振动监控标准经过几轮完善优化，未发生因振动标准不当造成的严重故障，随着发动机使用经验总结，目前发动机外场振动标准存在不完善之处，尤其是针对目前外场因碰摩造成的短时振动偏大问题，其监控及处置策略给外场发动机振动监控带来了一定的困扰和不便，而且随着飞行强度的增加，这种困扰和不便可能会进一步的加剧和放大，导致部分发动机无实质危害性振动而提前返厂，对外场发动机使用维护带来不利影响。

综合发动机外场使用实际和多年振动分析可知，目前该型发动机外场因碰摩造成的典型振动偏大并不会对发动机造成安全影响，结合发动机振动特点和模式，对外场整机振动监控不完善之处进行了梳理，提出了增加振动故障确认时间、外场振动告警判决条件、振动记录功能方案等优化方案；外场振动监控改进旨在减少典型碰摩振动偏大造成的超限告警和发动机返厂维修。结合当前发动机使用情况和相关整机振动特点，在保障发动机振动监控安全的前提下，开展外场整机振动监控的改进和完善，使整机振动监控能够更好的判断是否为发动机结构故障，保障发动机飞行安全。

本文从当前整机振动问题现状出发，梳理当前外场发动机振动表现和问题，并结合外场实际使用和发动机返厂分解检查情况，阐述当前外场短时碰摩振动的危害性；对发动机整机振动监测方案的完善进行了梳理；结合外场使用实际，对目前外场振动监控不完善之处进行分析并给出了优化方案。

## 2. 振动特征

机载振动偏大是某型发动机在外场使用和试车过程中发生最多、最广泛的振动模式，也是最顽固的振动模式，总结某型发动机机载振动偏大主要有两种表现形式：

- 1) 慢车上推高状态过程的过渡态振动偏大；
- 2) 慢车上推到高状态稳定后的振动偏大。

### 2.1. 慢车上推高状态过程的过渡态振动偏大

某型发动机过渡态振动偏大主要表现为慢车上推高状态的过渡态振动偏大。主要有以下两种振动模式：

- 1) 暖机状态之后下拉至慢车，然后慢车上推到高状态的过渡态振动偏大；典型的时域如图 1 所示；
- 2) 高状态持续一定时间后拉到慢车，在慢车停留一定时间后再上推到高状态过程中的振动偏大，典型时域如图 2 所示。

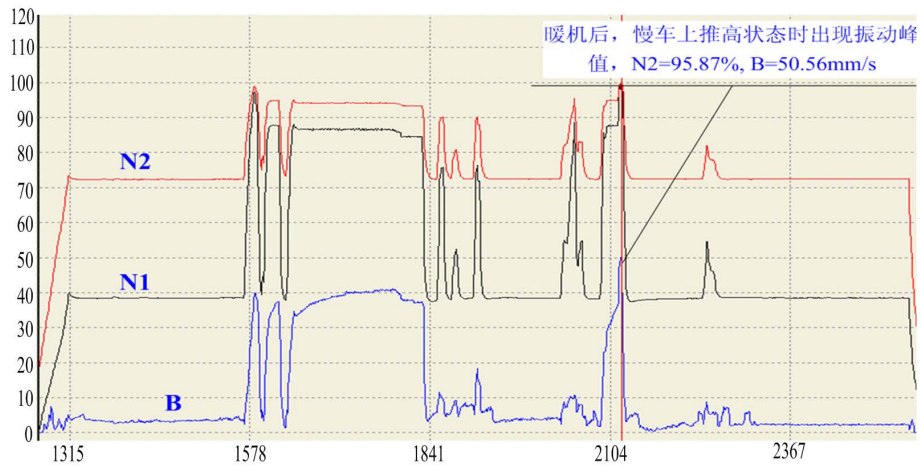
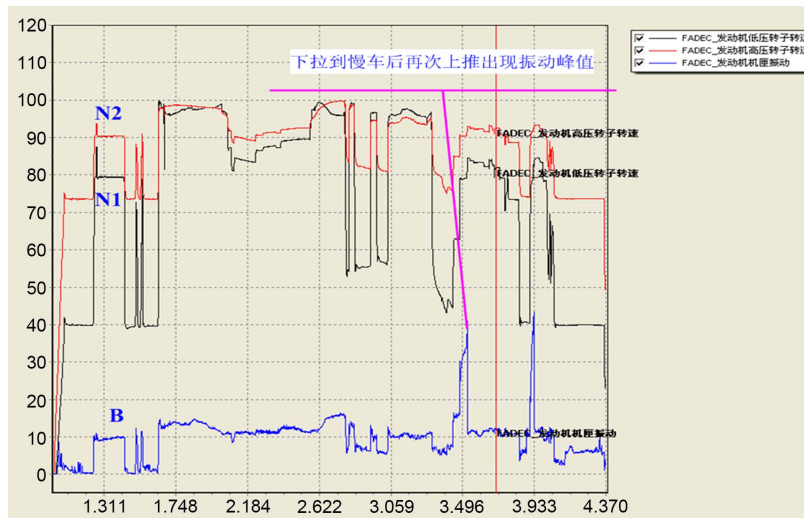


Figure 1. Typical time domain in which the vibration of the transition state from slow vehicle to high state is larger

图 1. 慢车推到高状态的过渡态典型时域



(a)

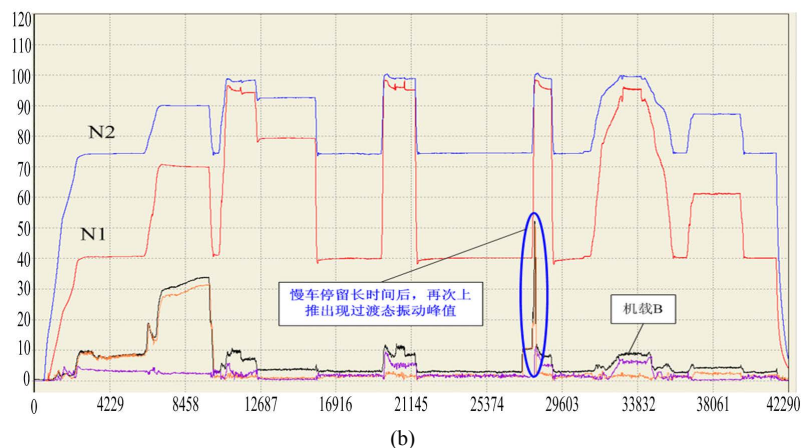


Figure 2. Typical time domain in which a slow car stops for a certain amount of time and the vibration of a high state process becomes larger

图 2. 慢车停留一定时间上推到高状态过程振动偏大的典型时域

## 2.2. 慢车上推到高状态稳定后的振动偏大

某型发动机在试车和外场使用过程中，稳态振动偏大是一种典型的振动特征。稳态振动偏大主要有两种表现形式：

1) 试车过程中振动B值在稳态时振动偏大，随着稳态转速升高B值呈增大趋势，该种稳态振动偏大，并存在振动不降和突降两种情况。典型的时域如图3和图4所示；

2) 发动机在暖机稳态振动偏大，尤其是在外场，暖机时振动偏大现象较为突出，暖机稳态振动偏大，并存在振动不降和突降两种情况。典型的时域如图5和图6所示。

结合多次振动分析，发动机高压振动特征基本一致，总结高压振动，主要有以下典型特征：

- 1) 机载B值和高压基频振动较大，主要表现为上推过程振动峰值或暖机稳态振动偏大；
- 2) 慢车停留时间对振动有着直接的影响，即振动峰值与温度直接相关。

以上产生的振动属于与转子转速有关的振动，一般与转子不平衡或者不对中，转动件与静止件碰磨，发动机转子热弯曲，发动机同心度问题，发动机主轴承故障，附件传动齿轮、轴承损坏、齿轮故障、轴承座松动，弹性支撑故障，轴承裂纹，旋转失速，轴承裂纹，旋转失速与喘振，不均匀气流涡动，此外还有由转子带动的其他结构如传动齿轮系、叶栅尾流等引起的规律性激振力相关。

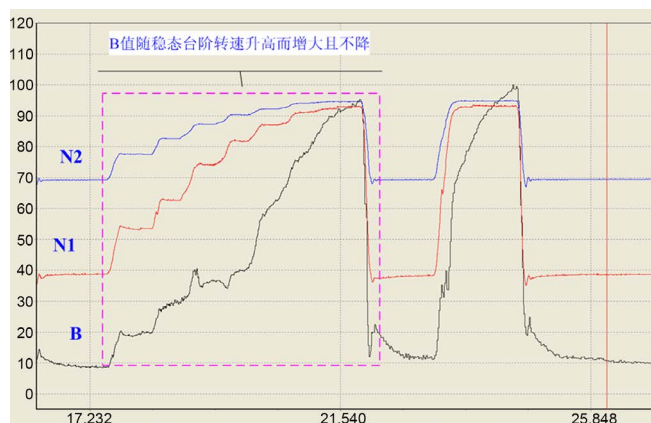


Figure 3. The vibration of steady-state step is large and increases with the increase of rotating speed

图 3. 稳态台阶振动大且随转速升高振动增大且不降

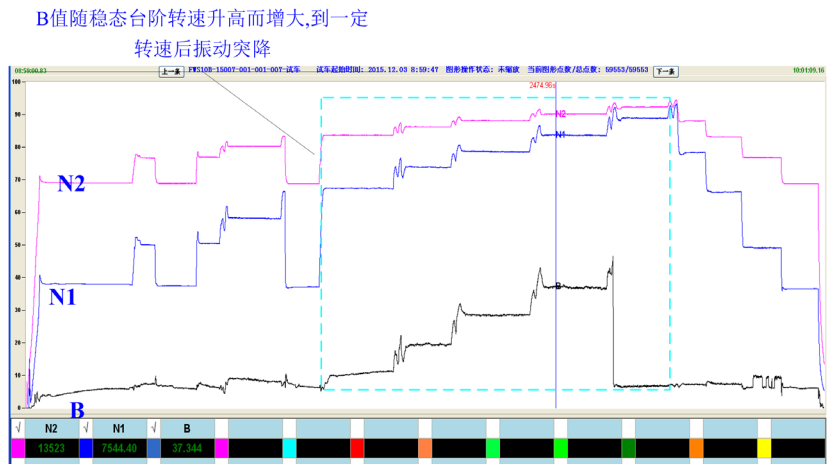


Figure 4. The steady-state vibration of the step is large, and the vibration increases and changes abruptly with the increase of rotating speed

图 4. 稳态台阶振动大且随转速升高振动增大且突降

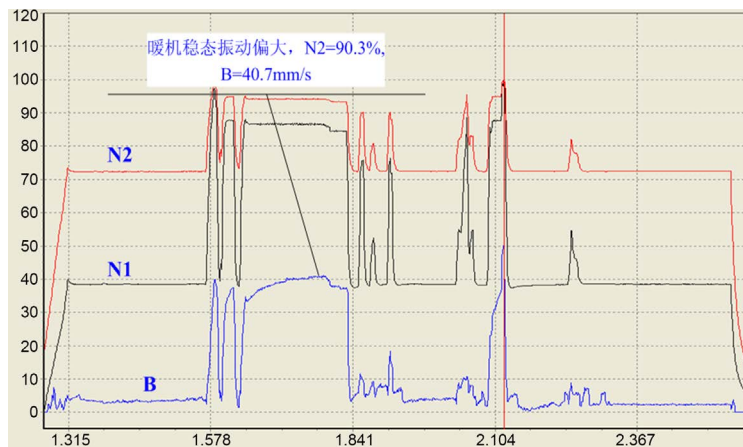


Figure 5. The steady-state step vibration is too large and does not decrease

图 5. 暖机稳态振动偏大且不降

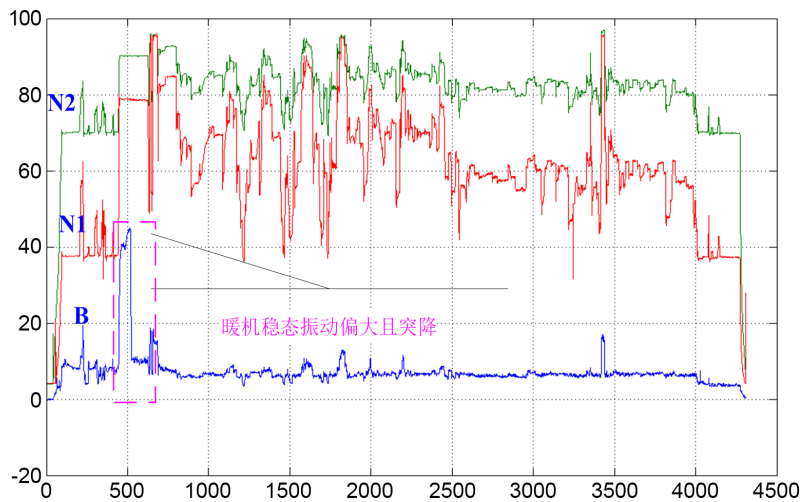


Figure 6. The steady-state vibration of the warm-up unit is large and drops suddenly

图 6. 暖机稳态振动偏大且突降

### 2.3. 外场振动情况

振动超限主要集中在飞行、地面过渡态和地面稳态。如图 7 所示。

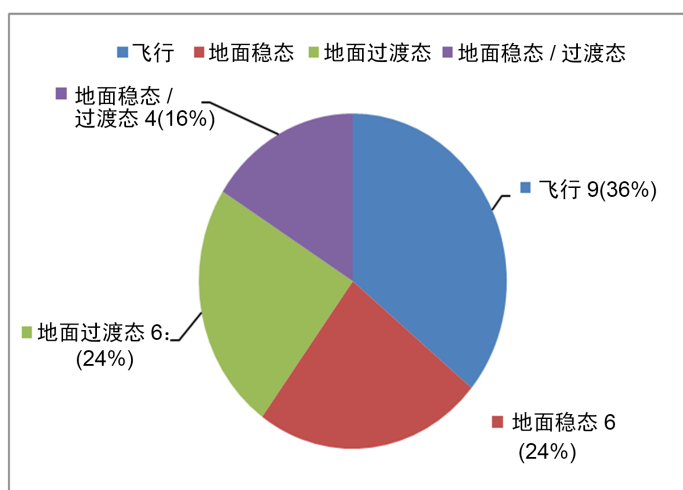


Figure 7. Vibration over-run type  
图 7. 振动超限类型

从近两年外场振动的 18 台发动机振动表现情况的统计结果分析：

1) 振动最大值为 87.4 mm/s，最小值为 69.8 mm/s，振动最大值不大于 75 mm/s 的共 11 台，占比 61.1%；

2) 16 台发动机振动时间，最长的为 5 s，最短为 0.5 s，振动时间不大于 3 s 的共 14 台，占比 87.5%。

综合 2017 年和 2018 年外场振动的统计分析情况得到：

- 1) 因地面试车振动超限导致发动机返厂占比较高；
- 2) 因空中飞行振动偏大返厂的，部分发动机未超限，但为了防止这种发动机使用过程中振动超限报警，发动机也返厂排振；
- 3) 空中振动超限报警的报警时长多在 3 s 以内；
- 4) 空中振动超限告警时的振动最大值多数不超过 75 mm/s。

综上分析，多数超限均在 75 mm/s 以内，振动时间较短，未对机体结构造成实质性损害，一般是由转子转动或碰磨产生的不平衡力引起的。

### 3. 振动危害性分析

某型发动机在外场和厂内试车过程中，发动机均出现过振动偏大的情况，有正常使用到寿的、有部分发动机监控使用，也有发动机返厂分解的，发动机使用过程均未出现因振动问题出现的结构性故障，分解检查也未发现有异常的结构件损伤。图 8~13 给出了 5 台发动机整个翻修期内历次过渡态和稳态振动最大值统计。

统计可以看出：

- 1) 5 台发动机在整个首翻期使用期间内整机振动有一定的波动现象；
- 2) 5 台发动机在整个首翻期使用期间内，过渡态和稳态振动最大值整体水平随着时间历程的变化基本趋于稳定，且大多数略有下降的趋势；
- 3) 5 台发动机整个首翻期使用期间，在部分试车过程中均出现过较大的过渡态振动峰值，发动机继

续使用后，并未出现振动恶化或其他结构故障，安全使用到首翻期到寿。

这是不损伤机体结构和威胁使用安全的振动。振动多由转子产生的不平衡力引起的，随着使用时间的增加，旋转部件逐渐磨合，当磨合到达一定程度时，振动趋于稳定，甚至减小。

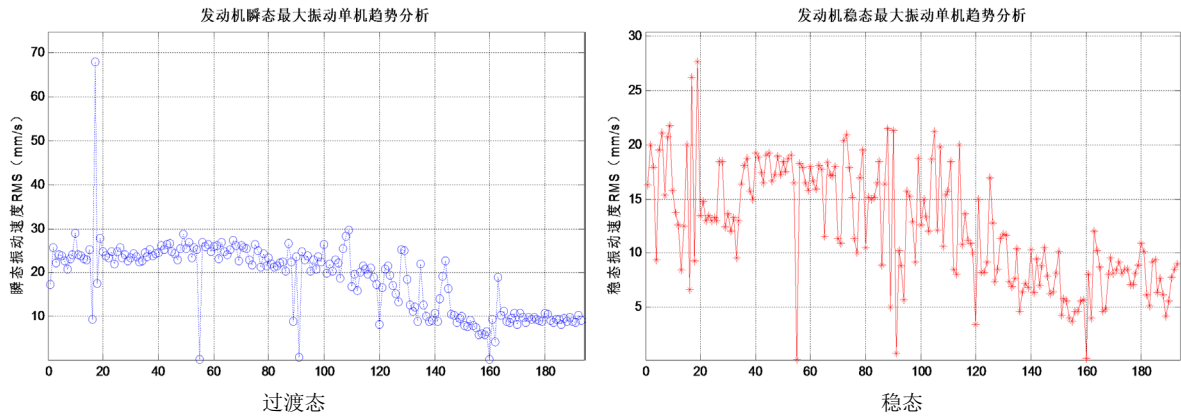


Figure 8. Maximum vibration values of No. 1 engine (sorted by time)

图 8. 1 号发动机历次(按时间排序)振动最大值

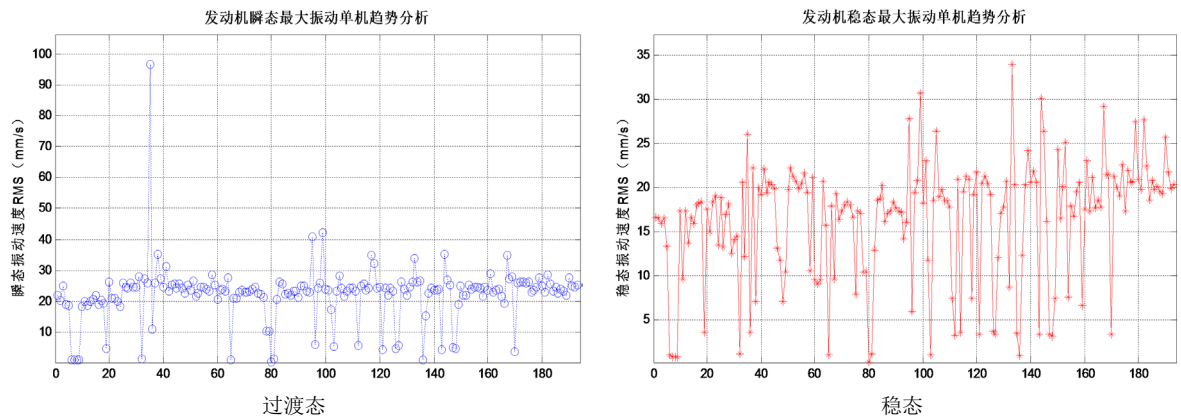


Figure 9. Maximum vibration values of No.2 engine (sorted by time)

图 9. 2 号发动机历次(按时间排序)振动最大值

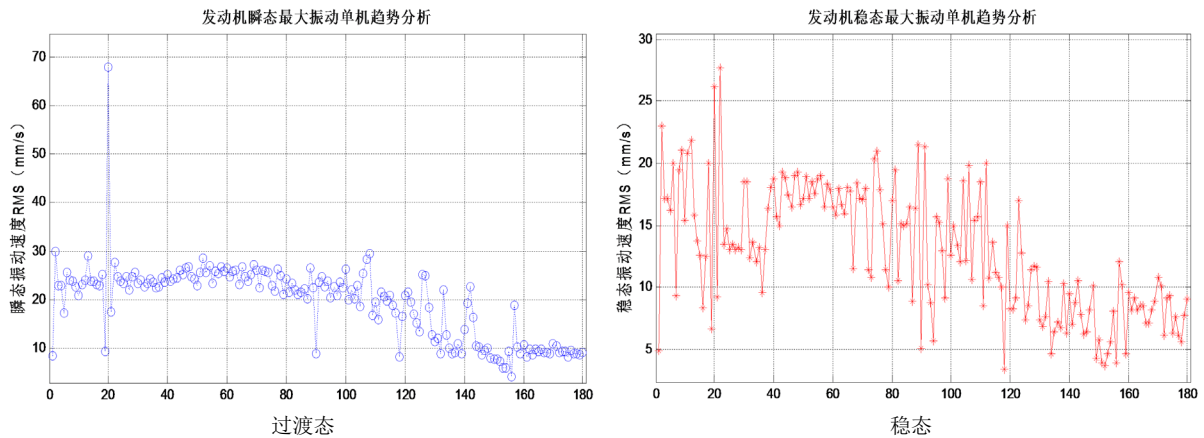


Figure 10. Maximum vibration values of No.3 engine (sorted by time)

图 10. 3 号发动机历次(按时间排序)振动最大值

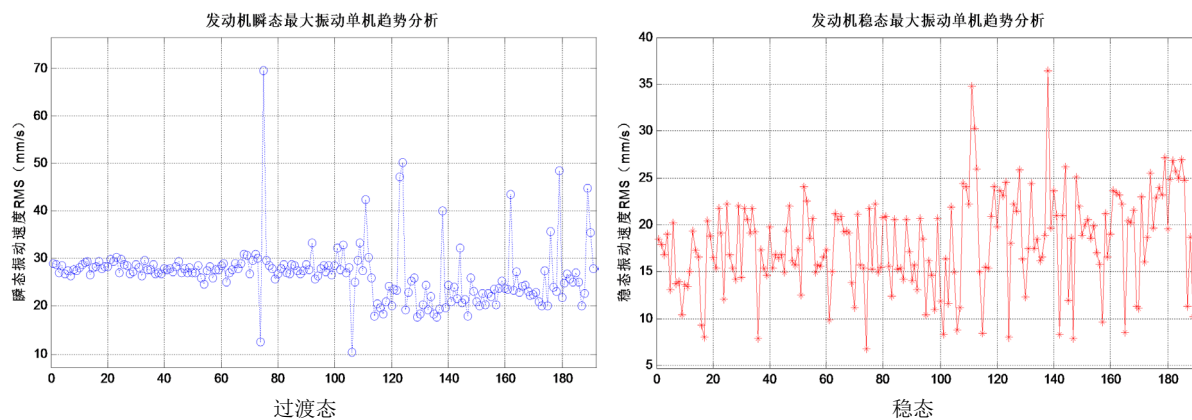


Figure 11. Maximum vibration values of No. 4 engine (sorted by time)

图 11. 4 号发动机历次(按时间排序)振动最大值

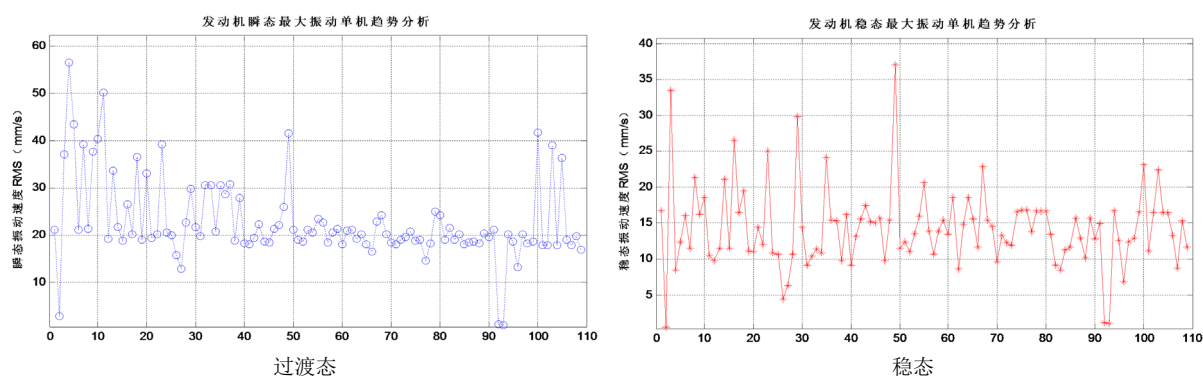


Figure 12. Maximum vibration values of No. 5 engine (sorted by time)

图 12. 5 号发动机历次(按时间排序)振动最大值

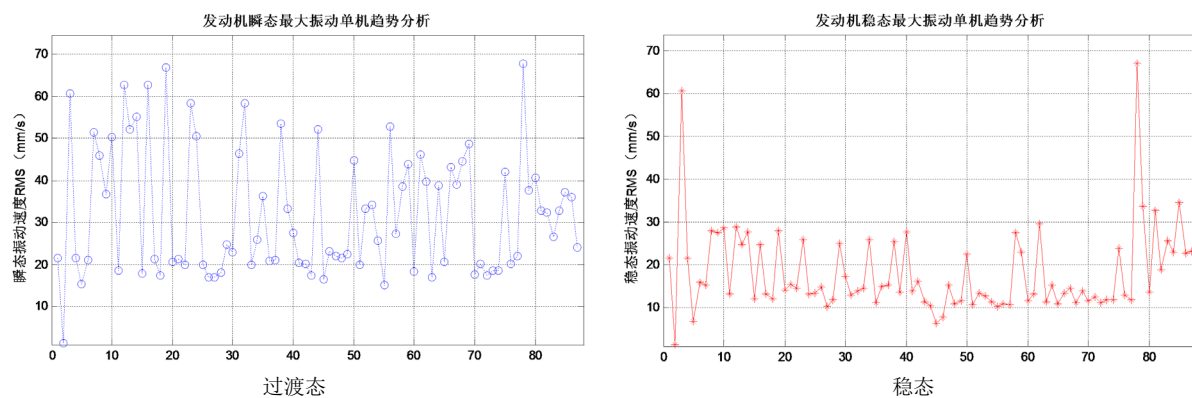


Figure 13. Maximum vibration values of No. 6 engine (sorted by time)

图 13. 6 号发动机历次(按时间排序)振动最大值

#### 4. 发动机振动使用时间统计

针对外场振动监控使用发动机中的 17 台“使用到寿返厂”、20 台“发生故障返厂”以及 13 台“再次振动返厂”三种类型的监控后使用时间, 进行时间分段统计, 如图 14~16 所示。

通过统计分析可知:

1) 外场振动监控使用发动机后续可使用到寿的占比为 46%。在使用到寿的发动机中, 监控使用时间



超过 100 小时的占 76%、超过 200 小时的占 59%;

2) 外场振动监控使用发动机后续再次振动返厂的占比为 35%，再次振动返厂的发动机中，两次振动故障间隔时间在 50 小时内的占 54%、100 小时内的占 85%。

监控使用作为发动机振动后使用的一种有效手段，多数飞机都能使用，当振动超过一定幅值时，要返厂处理。

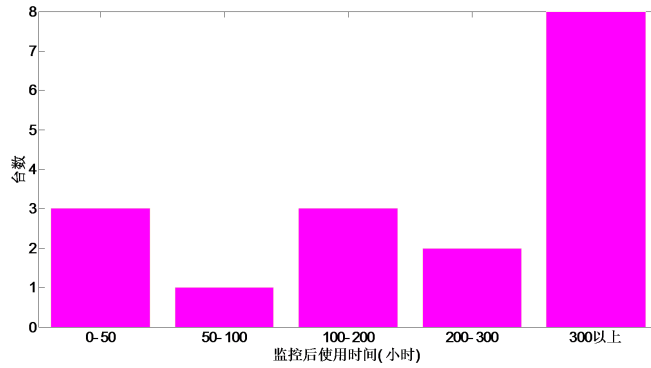


Figure 14. Statistics of service time of 17 engines returned to factory after monitor  
图 14. 17 台监控后使用到寿返厂发动机使用时间统计

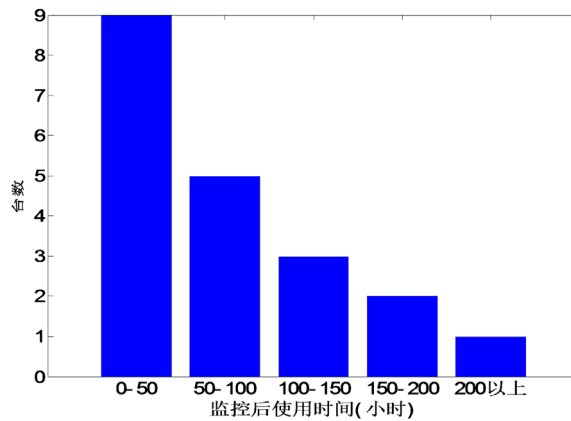


Figure 15. Statistics of service time of 20 engines returned to factory after monitoring  
图 15. 20 台监控后发生故障返厂发动机使用时间统计

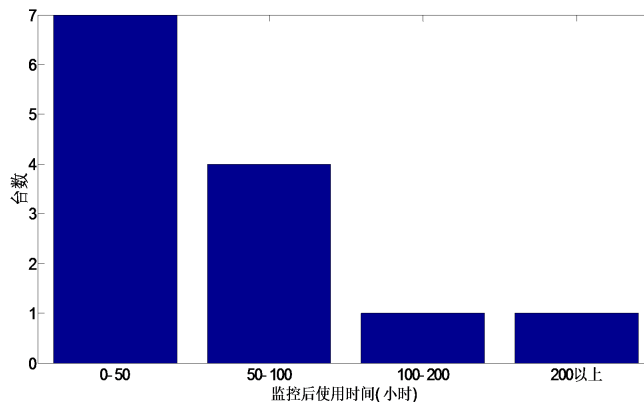


Figure 16. Statistics of service time of 13 engines returned to factory after monitoring  
图 16. 13 台监控后再次发生振动故障返厂发动机使用时间统计

## 5. 振动监控改进方案设计

根据某型发动机外场振动监控维护实际,开展某型发动机外场振动监控改进方案设计。针对发动机外场振动实际,采取如下改进措施。

### 1) 增加“故障确认时间的振动报警”功能

现状:目前某型发动机外场飞行时振动限制限制值与告警值相同,且采用触发即报警的策略。

存在问题:目前的报警策略是超限即报警,而发动机外场超限的发动机中多数由于碰摩造成的瞬时振动超限,对飞行安全以及发动机结构并无实质性危害。目前这种告警给飞行造成了较大的影响,也对发动机外场使用维护和完好率造成了一定的影响。

改进计划:增加“故障确认时间的振动报警”功能。

当转速大于 90%状态的过渡态时刻,振动测量值超限,采用故障确认时间的振动报警方式:设定振动超限时刻为  $t_0$ ,确认经过  $\Delta t$  时间后振动是否仍超限,如是则发出整机振动报警信号;如否,则不报警。

### 2) 增加外场振动告警判决条件

现状:目前外场限制标准为即时报警值;后续增加故障确认时间后,即实现了振动超过阈值且持续时间超过  $t_0$  才报警的判决逻辑。

存在问题:针对某些突发故障,如吞鸟、叶片断裂等瞬时故障,延迟报警可能会错过一些最佳处置时间。

改进计划:在增加故障确认时间后,同时再设置即时告警值,该告警值为即时报警值,超过该值即时报警,进一步保障飞行中振动监控。

### 3) 增加外场振动大控制器记录事件功能

现状:目前外场振动超限告警为发动机最高告警级别,未设置其他报警级别。

存在问题:目前外场告警级别相对较高,后续如果增加了故障确认时间和外场振动告警判决条件后,可能存在部分发动机振动值偏大但未报警,这虽达到了减少告警目的,但对发动机整个外场振动监控存在一定的漏洞,针对振动偏大且未达到告警级别的,也需要甄别出来。

改进计划:增级振动控制器记录事件功能。

## 6. 结论

外场振动监控标准是要适应与发动机自身振动特性和振动故障模式,当前某型发动机外场振动监控存在不完善之处,给外场的使用和维护中的振动监控带来了一定的不便和困扰。针对某型发动机的振动特性、模式和发动机振动使用时间分布,提出了改进振动监控方案,提出了如增加振动故障确认时间、振动告警判决条件、振动记录事件功能措施方案等。旨在减少外场因典型碰摩振动偏大造成的超限告警和发动机返厂,提高发动机使用效率。

## 参考文献

- [1] 费成巍,白广忱.基于 WCFSE-FSVM 的转子振动故障诊断系统[J].推进技术,2013,34(9):1266-1271.
- [2] 张赞,李本威,贾舒宜,等.航空发动机混叠振动信号的欠定盲源分离方法[J].推进技术,2014,35(4):553-558.
- [3] Sun, W.-X., Chen, J. and Li, J.-Q. (2007) Decision Tree and PCA-Based Fault Diagnosis of Rotating Machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **21**, 1300-1317. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.06.010>
- [4] 王广斌,李学军,黄良沛.基于 Schur 正交的局部 Fisher 判别转子故障诊断[J].机械科学与技术,2011,30(1):62-65.
- [5] 蒋玲莉.基于核方法的旋转机械故障诊断技术与模式识别方法研究[D]:[博士学位论文].广州:中山大学,2010.

- 
- [6] Seung, H.S. and Lee, D.D. (2000) The Manifold Ways of Perception. *Science*, **290**, 2268-2269. <https://doi.org/10.1126/science.290.5500.2268>
- [7] Bruske, J. and Sommer, G. (1998) Intrinsic Dimensionality Estimation with Optimally Topology Preserving Maps. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **20**, 572-598. <https://doi.org/10.1109/34.682189>
- [8] Zhang, Z. and Zha, H. (2004) Principal Manifolds and Nonlinear Dimension Reduction via Local Tangent Space Alignment. *SIAM Journal of Scientific Computing*, **26**, 313-338. <https://doi.org/10.1137/S1064827502419154>
- [9] 吴娅辉, 李新良, 张大治. 基于 D-S 证据理论的航空发动机振动故障分析[J]. 计算机应用与软件, 2012, 6(29): 105-107.
- [10] 张永峰. 飞行试验中航空发动机振动监测[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [11] 肖云魁, 李世义, 王建新, 等. 以粗糙集近似逼近理论提取发动机振动故障特征[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(4): 262-265, 317.
- [12] 梅检民, 周斌, 司爱威, 等. 基于变精度粗糙集理论提取发动机振动故障特征[J]. 车船装备保障, 2009, 11(3): 43-47.
- [13] 谭旭, 唐云岚, 张少丁, 等. 杂合数据的粗糙集属性约简方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6): 83-88.
- [14] 沈永红, 王发兴. 基于信息熵的粗糙集属性离散化方法及应用[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(5): 221-224.