

航空发动机限寿件使用寿命监视研究

赵 勇, 李本威, 宋里宏
(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘 要: 随着单元体设计与基于状态维修等理念的发展, 为克服早期传统的使用监视方法的不足, 提出并发展了航空发动机限寿件使用寿命监视技术。在归纳发动机使用监视发展历程的基础上, 重点论述了使用寿命监视概念、功能结构、发展现状及未来趋势, 并对比了使用寿命监视相对于早期使用监视方法的优越性与研究的必要性; 详细分析了使用寿命监视需解决的关键技术及潜在的应用前景; 最后结合国内现状, 给出了开展使用寿命监视研究的相关建议。

关键词: 航空发动机; 使用寿命监视; 限寿件; 基于状态的维修; 预测与健康管理(PHM); 寿命延长控制

中图分类号: V231.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2016) 02-0032-06

Research on life usage monitoring of aero-engine life-limited parts

ZHAO Yong¹, LI Ben-wei¹, SONG Li-hong²

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: With the development of these theories like component design and on-condition maintenance, life usage monitoring of aero-engine life-limited parts was proposed to overcome the deficiency of the traditional usage monitoring method. Based on the engine usage monitoring development process, the definition, functional composition, research status and future directions of life usage monitoring were introduced in detail. Moreover, the advantage and necessity of life usage monitoring were compared with the traditional usage monitoring method, and the key technologies and potential applications were also analyzed. Finally, combined with the domestic status, relative suggestions on life usage monitoring were put forward.

Key words: aero-engine; life usage monitoring; life-limited parts; on-condition maintenance; PHM; life extending control

1 引言

20 世纪 70 年代随着单元体设计概念的提出, 以及维修思想从定时维修到视情维修的转变, 使用寿命监视受到了前所未有的关注^[1]。使用寿命监视就是利用发动机测量参数建立一个准确反映限寿件寿命消耗的数学模型, 根据每次飞行参数的测量与处理, 计算限寿件在实际使用中的寿命消耗^[2-3]。其目的在于监视和跟踪限寿件的实际使用情况, 以便充分利用其可用寿命, 使其使用更加经济有效、安全合理^[4]。文献[5]中表明, 通过引入使用寿命监视, 可使

发动机限寿件在不降低使用安全性的前提下平均使用寿命翻倍。军用飞机在作战训练使用中, 由于飞行剖面的多样性而更加突出了对这项工作的需求, 并使使用寿命的跟踪更加复杂化^[6]。国外许多军用航空发动机从上世纪 70 年代就陆续加装了使用寿命监视系统^[7-11], 而国内仍大多采用基于飞行时间或起落数的传统方法, 亟待发展适应我国军用发动机使用的限寿件使用寿命监视技术。

使用寿命监视技术的发展, 对于引导目前国内维护保养模式改革及优化发动机使用具有极大的推动作用。而如何发展与应用使用寿命监视技术, 重

收稿日期: 2015-07-27; 修回日期: 2015-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51375490); 海军航空工程学院研究生创新基金

作者简介: 赵 勇(1986-), 男, 湖南常德人, 博士研究生, 研究方向为航空发动机使用寿命监视。

点发展哪些关键技术等,都成了亟待解决的问题。鉴于此,本文在归纳航空发动机使用监视历程的基础上,重点分析了基于飞参使用寿命监视发展的必要性、现状与未来趋势、关键技术及应用前景等,并结合国内现状给出了国内开展使用寿命监视研究的相关建议。

2 航空发动机使用监视历程

使用监视作为确保航空发动机安全使用的重要保障,从发动机投入使用开始就受到了足够重视,并处于不断发展之中。总的来说,航空发动机使用监视经历了从简单到复杂、从离线到在线、从单一到综合化的发展过程。

2.1 早期基于飞行时间或起落数的使用监视

早期的航空发动机使用寿命监视中,大多采用记录发动机工作时间或飞行起落数的方法,来对限寿件进行寿命监视与管理。这种方法在发动机寿命件的设计阶段,通常只考虑一个标准飞行剖面(设计载荷谱),通过详细计算其应力、温度及利用材料特性与失效模式,给出该标准飞行条件下发动机部件的安全使用寿命,并以此为标准在全机群范围内实施一刀切的基于飞行时间或起落数的监视与管理。事实上,使用过程中发动机寿命件的寿命消耗,与其实际所受的应力、应变及温度等载荷是分不开的。若按统一的飞行时间进行寿命管理,使用载荷较小时发动机寿命件继续使用的潜力被浪费,而使用在极度恶劣情况时则易发生安全事故。

2.2 基于飞参的使用寿命监视

发动机对其可靠性的更高需求及飞参技术的成熟发展,奠定了基于飞参的发动机限寿件使用寿命单机监视技术的基础。基于飞参的使用寿命监视以限寿件的累积损伤为限寿标准,通过利用发动机的实际使用数据,采用相关算法对发动机限寿件的寿命消耗进行单机追踪,当限寿件的累积损伤达到预定标准时予以报废与替换。其能在降低发动机部件使用风险的同时,极大地减少寿命周期维护费用。

图1以发动机三种特殊使用情况为例,形象对比了早期基于飞行时间或起落数和基于飞参两种监视方法的特点,及开展使用寿命监视的必要性。

2.3 国外典型的使用寿命监视系统

国外航空技术强国多年来在军用和民用使用监视领域,都进行了大量的研究与试验,开发了很多典型的使用寿命监视系统,积累了丰富的经验^[12-13]。

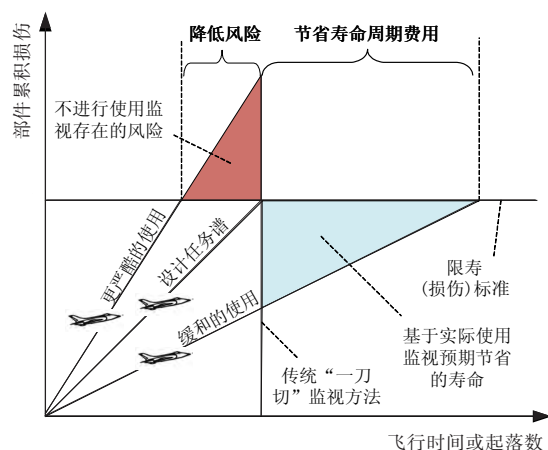


图1 使用监视方法特点对比

Fig.1 Comparison of usage monitoring methods

F100发动机机载的事件历史记录器(EHR),用于监视发动机的特定参数,并为地勤人员提供直接读数。EHR记录了来自电子控制器的高压转速循环、低压涡轮进气温度等参数,可进行部件的寿命管理和故障检测。B-1B装配的F101-GE-102发动机、F-16装配的F110-GE-100发动机以及F-14装配的F110-GE-400发动机,都具有发动机寿命件使用寿命监视功能。其中,F101发动机的使用寿命监视功能合并到了发动机的中央集成测试系统中,F110发动机的使用寿命监视则与发动机监视系统(EMS)实现了一体化,这两种系统都采用了机载数据采集与地面站深入分析寿命使用的模式。T700发动机的历史记录器可对发动机17个限寿件的使用寿命进行监视,其4个数字显示窗口分别显示限寿件的不同循环数及工作时间。F404-400发动机的使用寿命监视功能合并在其空中发动机状态监视系统(IECMS)中,监视的使用寿命参数包括完整和部分转速循环、压气机出口压力完整循环、高压涡轮叶片前缘尾缘温度等,可对发动机的25个限寿件的低周疲劳进行跟踪。

德国早在1982年就已产生开发机载使用寿命监视系统(OLMOS)的思想^[8]。OLMOS集成在飞参记录仪的数据采集单元中,通过一数学模型来计算转子的瞬态温度和应力,进而评估转子的低周疲劳寿命消耗。截止1997年,德国空军Tornado飞机装配的RB199发动机的OLMOS已对机群进行了10多年的跟踪监测^[14],相比于传统监视方法,OLMOS的引入能最大化地利用寿命件的使用寿命(图2),对飞机和发动机的操作、维护产生了重大影响。图3给出了OLMOS在机群范围内对低压压气机某关键部位

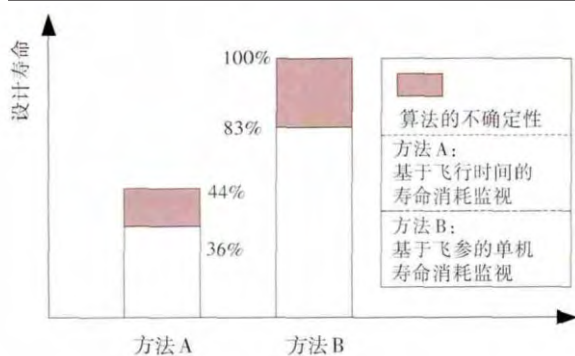


图2 不同监视方法下寿命件使用寿命平均利用情况

Fig.2 Mean life usage of life-limited parts with different monitoring methods

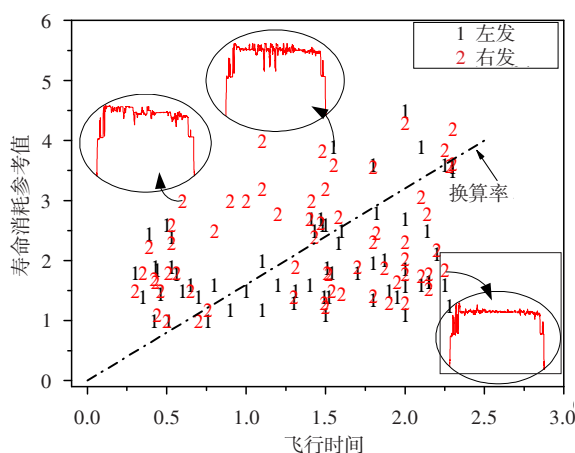


图3 低压压气机某关键部位使用寿命监视统计结果

Fig.3 Statistical result of life usage monitoring for a critical area in low pressure compressor

77个飞行剖面监视的统计结果。可见,使用寿命与飞行时间的关联性不强,利用飞行时间的折算来衡量使用寿命的方法分散性太大;即使执行相同的飞行任务,同一飞机上两个发动机的实际使用寿命也差异较大。

早在20世纪70年代中期,英国就开始了空军装配的发动机使用寿命监视系统(EUMS)的开发,记录的参数包括转子转速、进气温度、排气温度等,可准确评估发动机主要旋转部件低周疲劳寿命的使用情况。系统开发完成后又进行了更新,先后开发了两个新版本。AV-8B飞机装配的飞马MK105、F402-RR-406发动机监视系统都具有使用寿命监视功能,可监视发动机主要部件的低周疲劳寿命和高压涡轮叶片的蠕变/热疲劳寿命。在该系统使用早期,只可监视6个主要部件的低周疲劳使用寿命,其他部件都采取折算因子的方法进行换算。经过算法改进后,该系统可直接监视发动机36个关键部件

的使用寿命,并具有很高的精度。

目前,F119、EJ200及F135等先进发动机,无一例外地配备了发动机健康管理系统,并实现了使用寿命监视功能与发动机健康管理系统的综合一体化^[15-16]。F119发动机的使用寿命监视功能分为机载和地面两部分,机载模块可在线计算寿命件的寿命消耗,包括热端部件的蠕变寿命,低周疲劳寿命,工作时间、加力点火次数等使用寿命参数,由机载的独立发动机诊断单元(CEDU)实现;地面模块可进行关键部件的寿命消耗累积及相应的维护任务优化。EJ200发动机的使用寿命监视功能也分为机载和地面两部分,机载部分可根据机载飞行任务剖面数据实时计算部件寿命消耗,并随着飞行的继续不断更新;地面部分负责对机载的使用寿命结果进行核查,并预测限寿件的可用剩余寿命,以便制定合理的维护计划。其使用监视模块可监视关键部件的低周疲劳、蠕变及热机械疲劳等,监视的部件及对应损伤机理如表1所示。F135发动机代表当今发动机的最高发展水平,其使用寿命监视功能模块可在线计算和跟踪限寿件的使用寿命消耗,并能根据计算的寿命消耗和预测的剩余寿命,实时评估发动机执行预定任务的能力,从而为指挥人员提供科学决策依据。可见,国外对使用寿命监视的研究日益重视,使用寿命监视系统的发展呈现出涵盖面广、功能全面、与PHM(预测与健康管理系统)综合一体化等特点。

表1 EJ200发动机使用寿命监视的部件及损伤机理

Table 1 Life usage monitoring component in EJ200 and damage mechanism

部件	监视的关键部位数	损伤机理
低压压气机	14	低周疲劳
高压压气机	34	低周疲劳
燃烧室壳体	2	低周疲劳
高压涡轮	15	蠕变、热疲劳、低周疲劳
低压涡轮	9	蠕变、低周疲劳

2.4 国内使用寿命监视研究现状

国内开展航空发动机使用寿命监视工作较晚,深入程度较国外差距较大。长期以来,国内根据发动机长试实践、使用大修经验、相近机型类比等方法,确定发动机使用寿命和翻修时间。寿命指标仍以发动机工作小时数为主,部队在使用中则根据发动机的工作时间来确定寿命消耗。

目前,国内已认识到航空发动机单机使用寿命

监视的重要性,并对此进行了大量研究。但从公开发表文献看^[2-4,6,13],国内关于发动机使用寿命监视系统的研究主要侧重于功能框架设计,深入程度不够,处理方法相对简单;相关研究主要集中在部件损伤机理、寿命预测方法及相关试验上,应用于具体型号的成熟使用寿命监视系统较少。

3 使用寿命监视关键技术分析

与传统监视方法相比,基于飞参的使用寿命监视需要对寿命件的载荷、寿命等进行快速计算分析,其功能(或流程)结构如图4所示。使用寿命监视的功能构成决定了其关键技术主要包括:性能参数计算,部件温度、应力分析,寿命消耗模型及验证技术等。

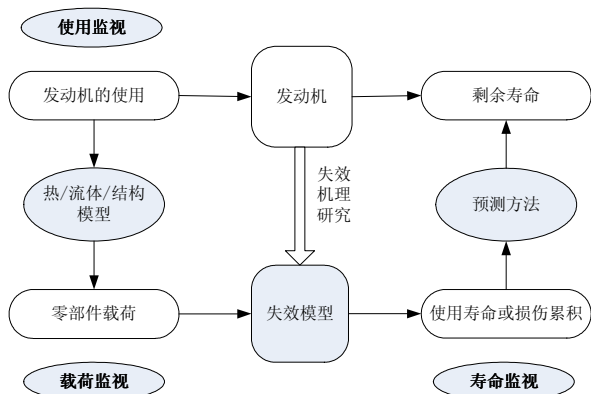


图4 使用寿命监视的功能结构

Fig.4 Functional structure of life usage monitoring

3.1 性能参数计算模型

使用过程中发动机限寿件所受的载荷分析需要以其实际工作参数为基础。虽然发动机机载飞参数据记录系统能提供部分易测参数,如大气条件、转子转速及部分截面的温度和压力,但是由于当前机载测试传感器大多为了控制安装,加之传感器技术限制无法工作在极端恶劣条件下,机载测试数据非常有限,不能完全满足各限寿件的使用寿命监视需求。

发动机性能仿真模型常用于计算使用寿命监视所需参数,能准确计算发动机在各种条件下运行时各截面的压力、温度和转子转速。但由于使用寿命监视涉及大量使用数据需要处理,且发动机性能仿真模型都较为复杂,计算时间较长,所以其并不适合直接用于使用寿命监视。另外,采用间接测量技术,通过建立与可测参数的关系,也可用来估计发动机的不可测参数,如文献[17]、[18]提到的逆循环方法

及文献[19]提到的神经网络方法。

适用于使用寿命监视的发动机模型应该是个简单高效的模型:运行速度快,却可较为准确地计算发动机各工作状态下的参数;可根据发动机机载测试参数及时更新发动机模型,以适应发动机性能退化。

3.2 温度、应力分析技术

发动机寿命件的寿命消耗与其实际使用中所受的温度、应力等载荷密切相关,部件温度、应力分析技术是发动机工作状态参数和部件寿命消耗之间的纽带。发动机工作状态参数主要指发动机转子转速和相关截面的温度、压力,而发动机限寿件的使用寿命消耗计算需要的是部件所受的温度、应力等负荷。发动机部件温度、应力分析的常用方法,包括定性方法、近似方法及有限元方法,各方法的特点如表2所示。

表2 常用载荷分析方法的特点

Table 2 Commonly used load analysis method

	定性方法	近似方法	有限元方法
处理方法	将部件转化为2维简化模型,仅考虑部件前后工作状态	合理性假设,忽略次要因素,采用微分方法进行计算	利用3维有限元方法分析部件所受热、机械应力
模型精度	较差,可用于定性分析	准确性视假设与微分而定,一般较高,可用于定量分析	精确
计算量	小	中	大
方法难度	小	适中	大

有限元方法是发动机部件载荷分析精度最高的方法,但有限元分析需要消耗大量的时间。由于使用寿命监视涉及大量使用数据需要处理与计算,直接将有限元方法应用于使用寿命监视明显不切实际,需研究满足使用寿命监视要求的载荷分析方法。

模型降阶方法能在较少牺牲精度的前提下,通过降低计算模型的复杂程度来提高其计算效率,通常可满足使用寿命监视对载荷分析的要求。常用的模型降阶方法按其原理,可分为基于模型分析的方法和基于数据分析的方法两类。其中,前者通过将有限元的节点自由度分类处理以省略一部分次要的节点自由度,进而降低有限元规模达到降阶的目的,此类方法主要有 Guyan 降阶法和部件模态综合法(CMS)^[20-21]。相比于前者,后者主要利用神经网络、支持向量机、回归拟合等算法对载荷分析模型进行辨识^[22-23],在确保精度的同时更能提高载荷分析的计

算效率。

3.3 寿命消耗模型

使用寿命监视最重要的关键技术之一,就是建立限寿件准确的寿命消耗模型。本文所指的限寿件,主要包括限制寿命的关键件(其故障可能危及飞行安全)和限制寿命的重要件(其故障会严重影响发动机性能、可靠性或使用成本)^[13]。由于发动机各限寿件所承载荷形式及强度都不同,限制其寿命的失效模式也不相同,主要包括低周疲劳、热疲劳、蠕变、高周疲劳、腐蚀等。表3给出了发动机典型限寿件的受载及失效模式。因此,理想的使用寿命监视系统应涵盖所有限寿件的各种失效模式,并针对各种失效模式都建立一个准确的寿命消耗模型。

表3 发动机典型限寿件的受载及失效模式

Table 3 Loads and failure modes for typical life-limited parts

部件名称	主要载荷	主要失效模式
压气机整流叶片	气动力	低周疲劳
压气机转子叶片	离心力、气动力	低周疲劳、高周疲劳
压气机轮盘	离心力	低周疲劳
燃烧室	热载荷	热疲劳、蠕变、热腐蚀
涡轮导向叶片	热载荷、气动力	热机械疲劳、高温蠕变、腐蚀疲劳
涡轮转子叶片	热载荷、离心力、气动力	热机械疲劳、高温蠕变、腐蚀疲劳
涡轮盘	离心力、热载荷	热机械疲劳、高温蠕变、腐蚀疲劳

影响发动机零部件寿命消耗的不确定性因素较多,确定性给出发动机零部件的寿命消耗值通常不切实际^[24]。考虑影响使用寿命消耗的不确定因素,进行使用寿命消耗的概率分析,可从概率的角度解释零部件使用寿命的分散性,更加客观准确地描述发动机实际寿命消耗规律^[25-26]。

3.4 验证技术

使用寿命监视的验证主要包括两方面,即使用寿命监视算法的验证和使用寿命监视系统的应用验证^[27]。由于使用寿命监视系统的应用验证涉及到一系列具体的工程应用问题,本文只侧重介绍使用寿命监视算法的验证。

使用寿命监视算法的验证,就是检验监视算法计算所得寿命消耗值与零部件实际寿命消耗值之间的差异是否达到要求。由于零部件实际寿命消耗值无法确定,通常采取与设计阶段寿命预测方法对比的方式来验证使用寿命监视算法的准确性。

4 使用寿命监视的应用前景分析

4.1 发动机预测与健康管理

21世纪航空发动机状态监视与故障诊断系统,将呈现出一体化、综合化及智能化特点,如发动机PHM系统。根据PHM的定义及国外航空发动机PHM技术的发展规划,使用寿命监视将作为发动机PHM技术的重要功能组成^[15-16]。使用寿命监视技术集成应用于PHM系统中,可进一步扩展PHM的功能,确保航空发动机关键件的安全使用和科学维护。

4.2 寿命延长控制

航空发动机寿命延长控制起步于2001年,能在少量牺牲发动机性能指标的前提下显著节省发动机部件的寿命消耗^[28]。在寿命延长控制技术中,发动机部件实时使用寿命计算模型至关重要。而目前国内关于航空发动机寿命延长控制的研究,只是采用简化的寿命模型进行定性研究^[29-30]。将使用寿命监视技术应用于寿命延长控制,能显著提高寿命消耗模型的准确性,使寿命延长控制的研究结果更加准确可信,进而加快寿命延长控制的实际应用进程。

4.3 基于状态的维护保障

使用寿命监视不是单纯监视限寿件的寿命消耗,其最终目的是预测限寿件的剩余寿命。将发动机零部件使用寿命监视与其维护保障策略相结合^[31],以便根据零部件的寿命消耗等制定相应的检查、维护、修理和替换计划,确保部件不会出现重大失效。利用使用寿命监视的结果指导维修,考虑了部件的实际使用,具有比基于日历时间维护保障模式更大的优势。

5 结论

基于对使用寿命监视的定义、功能结构、关键技术及国外典型系统特点的分析,结合目前国内发动机技术水平的现状,可形成以下结论或参考性建议:

(1) 使用寿命监视相对于传统监视方法考虑了发动机部件的实际使用情况,可显著提高发动机使用的安全性与经济性,具有较大研究价值。国外对使用寿命监视研究日益重视,使用寿命监视系统的发展呈现出涵盖面广、功能全面、与PHM系统综合一体化等特点。

(2) 国内多种战机都加装了飞行参数记录器,记录着大量反映发动机工作状态和工作环境的参数,这些数据的变化过程在一定程度上反映了发动机及其部件寿命耗损,因此国内开展基于飞参的发动机零部件寿命监视与管理在技术上可行。

(3) 由于机载测试水平及机载实时模型的限制,国内的使用寿命监视可采取机载飞参数据采集与地面站使用寿命深入分析的分布式形式。

(4) 基于使用寿命监视的结果及发动机的实际使用特点,开展发动机限寿件剩余寿命的预测方法研究,并尝试在整个机群范围内,将发动机限寿件的剩余寿命信息应用于发动机维护保障策略的优化及其安全使用。

(5) 着眼下一代战机,预先研究机载的使用寿命实时监视技术,开展使用寿命监视与发动机 PHM 系统的综合一体化设计和研究。

参考文献:

- [1] SAE AIR 1872B-1998, Guide to life usage monitoring and parts management for aircraft gas turbine engines[S].
- [2] 洪杰,张大钧,韩继斌. 航空发动机关键件使用寿命监视系统设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(1): 45—48.
- [3] 陈永刚,倪世宏,黄志宇. 基于飞行数据的航空发动机寿命监视系统设计[J]. 航空发动机, 2002, (4): 12—15.
- [4] GJB 2875-1997, 航空燃气涡轮发动机监视系统设计准则[S].
- [5] Hörl F, Richter K. Monitoring the EJ200 engine[C]//. Proceedings of the 18th Symposium "Aircraft Integrated Monitoring Systems". Stuttgart: 1995.
- [6] 苏清友. 航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [7] Pfoertner H, Rob C. Preparing life usage monitoring for the next decade[C]//. Proceeding of the 17th symposium on aircraft integrated monitoring systems. Stuttgart: 1995.
- [8] Broede J, Pfoertner H. Olmos in GAF MRCA Tornado-10 years of experience with on-board life usage monitoring [R]. AIAA 97-2905, 1997.
- [9] Suarez E, Hansen J, Duffy M, et al. New approach to tracking engine life[C]//. 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1997.
- [10] Pfoertner H, Graf S. Data condition methods for aero engine signal and their influence on the accuracy of fatigue life usage monitoring results[C]//. Proceeding of the 20th symposium aircraft integrated monitoring system. Gar-misch-Partenkirchen: 2000.
- [11] Tinga T, Visser W P J, de Wolf W B, et al. Integrated lifing analysis tool for gas turbine components[R]. ASME 2000-GT-646, 2000.
- [12] 尉询楷,杨立,刘芳,等. 航空发动机预测与健康管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [13] 陈卫,程礼,李全通,等. 航空发动机监控技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [14] Pfoertner H. Long-term operation and maintenance of engine monitoring systems - recommendations derived from 15 years of OLMOS used by the GAF[C]//. RTO AVT symposium on "Ageing mechanisms and control: part B - monitoring and management of gas turbine fleets for extended life and reduced costs". Manchester: 2001.
- [15] Jaw L C. Recent advancements in aircraft engine health management (EHM) technologies and recommendations for the next step[R]. AMSE GT2005-68625, 2005.
- [16] Volponi A J. Gas turbine engine health management: past, present, and future trends[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(5): 051201-1—20.
- [17] Benvenuti E. Innovative gas turbine performance diagnostics and hot parts life assessment techniques[C]//. Proceedings of the 30th turbomachinery symposium. Houston: 2001.
- [18] Carcasci C, Facchini B, Grillo F, et al. Development of diagnostic tools for real time assessment of gas turbine hot gas path component temperatures: A preliminary study[R]. ASME GT2002-30249, 2002.
- [19] Shankar P, Yedavalli R K. Neural-network-based observer for turbine engine parameter estimation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering, 2009, 223(6): 821—831.
- [20] Zucca S, Botto D, Gola M. A new reduction technique for thermal models with fluid networks[J]. Journal of Thermal Stresses, 2011, 34(7): 667—686.
- [21] Botto D, Zucca S, Gola M. A method for on-line temperature calculation of aircraft engine turbine discs[R]. ASME GT2002-30006, 2002.
- [22] Parthasarathy G, Allumallu S. Reduced models for rotating component lifing[R]. ASME GT2004-53993, 2004.
- [23] Parthasarathy G, Menon S, Richardson K, et al. Neural network models for usage based remaining life computation [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 012508-1—7.
- [24] Chen C L P, Guo T H. Design of intelligent acceleration schedules for extending the life of aircraft engines[J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Re-

(下转第31页)

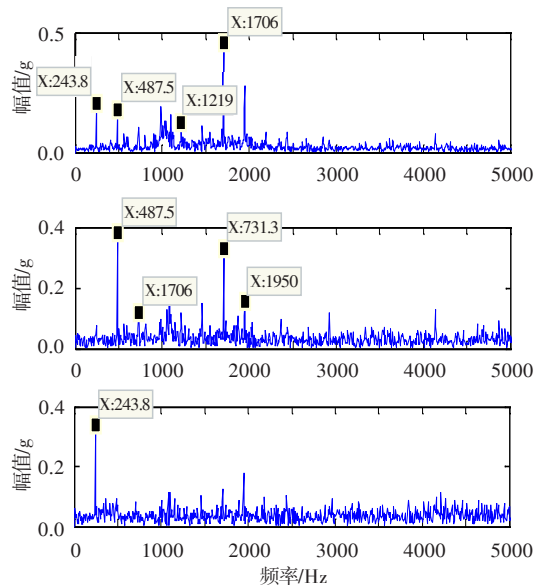


图13 优化处理后的分离信号幅值谱(实测信号)
Fig.13 Optimized separated signal amplitude spectrum
(actual measurement)

5 结论

通过对盲源分离原理的研究,建立时延自相关目标函数,从而优化最大信噪比盲源分离方法。利用优化信噪比的盲源分离算法,对航空发动机仿真信号和实测信号进行分析处理,结果表明:时延自相关优化处理能有效降低振动信号中的噪声,提高信噪比;优化最大信噪比分离方法,能有效分离航空发动机混叠振动信号中的不同故障特征;分离后各传感器信号频谱图基本上只显示出一种故障特征。

研究结果也表明,本文提出的方法为航空发动机振动信号的监测和故障诊断,提供了一种新的思路。但盲源分离方法在航空领域中的应用还处于探索阶段,需要对其有效性和适用性做进一步的验证研究。

参考文献:

- [1] 雷衍斌. 航空发动机振动信号分离技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [2] 张发启. 盲信号处理及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [3] Han S H, Kim H. Extraction of rotating machine sources for fault diagnostics using independent component analysis [C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference. Ottawa: 2005.
- [4] Nabil C, Yannick D. Self-adaptive separation of convolutively mixed signals with a recursive structure. Part 1: Stability analysis and optimization of asymptotic behavior[J]. Signal Processing, 1999, 73(3): 225—254.
- [5] Zhang Z L. Morphologically constrained ICA for extracting weak temporally correlated signals[J]. Neurocomputing, 2008, 71: 1669—1679.
- [6] Kokkinakis K, Nandi A K. Generalized gamma density-based score functions for fast and flexible ICA[J]. Signal Processing, 2007, 87(5): 1156—1162.
- [7] Lu W, Rajapakse J C. Approach and applications of constrained ICA[J]. IEEE Trans. Neural Nets, 2005, 16: 203—212.
- [8] 李舜酩, 杨 涛. 基于峭度的转子振动信号盲分离[J]. 应用力学学报, 2007, 24(4): 560—565.
- [9] 李舜酩. 转子振动故障信号的盲分离[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 751—752.
- [10] 李舜酩, 雷衍斌. 转子振动信号的二阶非平稳源盲分离[J]. 推进技术, 2008, 29(6): 747—752.
- [11] 李舜酩, 雷衍斌. 基于负熵的转子混叠振动信号盲识别[J]. 中国机械工程, 2009, 20(4): 437—441.
- [12] Cao X R, Liu R W. A general approach to blind source separation[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1996, 44: 462—571.
- [13] 张小兵, 马建仓, 陈翠平, 等. 基于最大信噪比的盲源分离算法[J]. 计算机仿真, 2006, 23(10): 72—75.

(上接第37页)

views, 2007, 37(5): 1005—1015.

- [25] 费成巍, 白广忱, 赵合阳, 等. 叶片径向变形的动态概率分析方法[J]. 应用力学学报, 2013, 30(2): 234—239.
- [26] 李洪伟, 叶 斌, 蔡 娜. 基于概率的航空发动机飞行换算率改进算法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(5): 1184—1190.
- [27] Broede J, Pfoertner H, Richter K. The importance of testing for successful life usage monitoring systems[C]// Proceedings of the 19th symposium aircraft integrated monitoring systems. Garmisch-Partenkirchen, Germany: 1998.

- [28] 陈小磊, 郭迎清, 张书刚. 航空发动机寿命延长控制综述[J]. 航空发动机, 2013, 39(1): 17—22.
- [29] 刘葆华, 黄金泉. 基于高压涡轮叶片寿命损耗的航空发动机功率控制[J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2836—2841.
- [30] 陈小磊, 郭迎清, 杜 宪. 航空发动机全寿命期自适应寿命延长控制[J]. 推进技术, 2014, 35(1): 107—114.
- [31] Tinga T. Application of physical failure models to enable usage and load based maintenance[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(10): 1061—1075.