

航空发动机气路故障静电监测技术研究



黄漫国,刘德峰,闫瑜,高云端,朱永波,于瑞

航空工业北京长城航空测控技术研究所 状态监测特种传感技术航空科技重点实验室, 北京 101111

摘要:航空发动机气路中任一部件的故障都会严重影响发动机的性能,甚至造成严重后果。本文研究了基于静电监测机理的发动机气路碎屑监测技术,设计了一套航空发动机气路故障静电监测系统,并在发动机模拟试验台上进行了两种典型故障模拟试验。研究表明,该系统通过监测发动机排气颗粒的静电电荷水平和变化规律,可判断发动机气路部件的故障情况,为发动机故障诊断和健康管理提供关键技术手段。

关键词:故障诊断; 航空发动机; 静电监测; 气路故障; 传感器

中图分类号:V231.25

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.10.004

航空发动机气路部件包括进气道、压气机、燃烧室、涡轮、加力燃烧室和尾喷口等几大核心部分,由于发动机结构的高度集成性、高度复杂性和耐受环境极度恶劣性,对这些气路部件的健康状态监测一直缺乏有效的技术手段^[1]。常规的气路故障诊断主要采取振动监测、基于气路参数的气路热力学模型监测等方法,但这些方法大多属于事后监测,必须在故障已经发生且足够严重时才能够监测到^[2-3]。另外,一些特殊故障也无法通过这些常规手段进行监测,如燃烧室积炭、喘振、热端部件掉块等。

近年来,气路静电监测技术作为一种新型的航空发动机在线监测手段,通过实时监测发动机静电水平可以实现发动机典型故障的监测及早期故障的预警^[4-5]。该技术最早由英国的Smith公司提出,Smith公司的研究表明,航空发动机的排气携带了燃烧产物、故障产物等体现发动机健康状态的关键生成物,通过对排气中固体颗粒带电情况的实时监测,建立电荷水平、发动机工况与健康状态的定量模型,可以间接实现发动机气路部件健康状态的监测,且这种监测方式由于只增加静电监测传感器,可以最大限度地减少发动机健康监测系统传感器的数量,不会造成额外的体积、重量、线缆、信号等的复杂度。同时,由于电荷水平的变化规律体现了气路部件的自身状态和关联状态,因此通过

设计高效的信号处理算法,可以得出大量有效信息,以辅助实现发动机气路部件的健康监测^[6]。目前,Smith公司的气路故障静电监测系统已经在F-35战斗机、C-17运输机^[7-9]等机型上测试使用,在F-35战斗机上,整套系统包括吸入物静电监测系统(IDMS)和发动机尾气碎屑静电监测系统(EDMS)两个部分,IDMS装在发动机进气道,用来监测进气道吸入异物状态,EDMS装在尾喷管上,用来监测发动机排气中颗粒携带电荷的变化情况。同时,IDMS和EDMS的组合监测,可以实现进出发动机气路的正常或异常颗粒电荷情况监测。相较国外的研究情况,国内的相关研究尚不全面,对发动机典型故障监测方面的研究尚不深入。因此,本文研制了一套航空发动机气路故障静电监测系统,并在自研的发动机模拟试验台上进行了烧蚀掉块、积炭两种典型故障的模拟试验,验证了航空发动机气路故障静电监测系统对发动机典型故障监测的有效性。

1 航空发动机气路故障静电监测机理

带电的物体接近或远离某一电中性的导体时,将会使导体极化,导体中的正负电荷重新分布,并且与带电物体电荷相反极性的感应电荷会聚集在导体表面,这一现象被称为静电感应^[10]。如果带电物体带的是正电,则导体表面会

收稿日期: 2023-05-18; 退修日期: 2023-08-09; 录用日期: 2023-09-11

引用格式: Huang Manguo, Liu Defeng, Yan Yu, et al. Research on electrostatic monitoring technology for fault diagnoses of aero-engine gas path[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(10): 24-29. 黄漫国, 刘德峰, 闫瑜, 等. 航空发动机气路故障静电监测技术研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(10): 24-29.

聚集负电荷;如果带电物体带的是负电,则导体表面会聚集正电荷。静电感应现象是点电荷或点电荷组与导体相互作用时产生的物理现象。考虑到带电物体的运动状态,当带电物体接近导体时,由于感应电荷会在短时间内聚集和消散,因此,导体中会由于感应电荷的运动而产生电流。通过监测电流的变化,可以间接实现对导体外带电物体的监测,这也是静电监测传感器工作的基本机理,如图1所示。

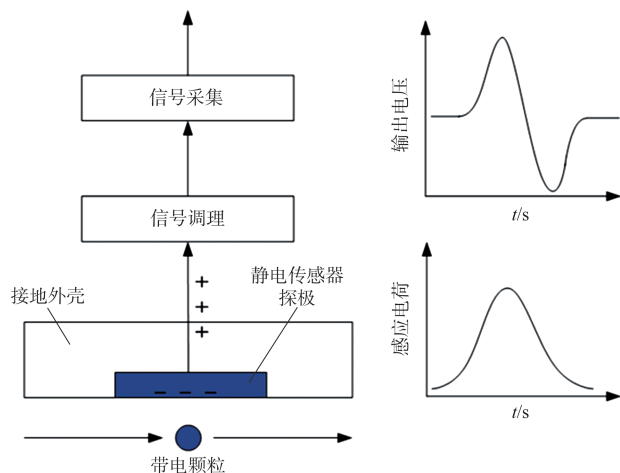


图1 静电感应机理

Fig.1 Electrostatic induction principle

在航空发动机常见的故障模式中,发动机整机故障主要有4类^[11]:一是性能故障,主要故障模式有推力下降、耗油率高、推力不稳定等,占发动机总故障的10%~20%;二是结构强度故障,包括风扇、压气机叶片裂纹、断裂,装配间隙不良或载荷不平衡使得叶片与机匣发生碰磨,涡轮叶片烧蚀掉块等,占发动机总故障的60%~80%;三是附件系统故障,如控制电路失灵导致燃油控制系统故障,油路堵塞导致的润滑系统故障,齿轮、花键过载引起的疲劳断裂、过度磨损故障等,占发动机总故障的10%~20%;四是其他类故障,包括吸入沙粒、鸟类等异物导致的叶片损伤或飞行导致的故障等,占发动机总故障的3%~5%。

在这4类故障中,几乎每一类故障都会在发动机排气中产生异常颗粒,如性能故障中,如果耗油率过高,将会产生额外的不完全燃烧的炭烟颗粒;结构强度故障中,叶片断裂或烧蚀掉块会直接在排气中产生大小不一的碎块;发动机吸入铁钉、铆钉等金属异物时会反复撞击多级叶片,也可能会直接导致零件碎块随气流排出。这些异常颗粒或者碎块、碎片粒径大于正常燃烧产生的炭烟颗粒(通常范围在40 μm 以上)^[12],在高温550~850 $^{\circ}\text{C}$ 、高速150~200m/s气流^[13]中会发生复杂的物理或化学变化,使之电中性遭到破坏从而携带上某种极性的电荷,如剧烈碰撞荷电、高温裂解荷

电、高速摩擦荷电等,这些颗粒的带电情况则在一定程度上可以反映气路部件的健康状态。

通过对排气中颗粒荷电变化情况的监测和对总体电荷水平的分析,可以得出发动机主要气路部件的健康状态,从而为发动机的故障诊断、健康管理和视情维护提供信息支持。将静电监测传感器安装在发动机尾喷口,利用采集到的静电电压信号可以计算出静电电荷分布情况。仅考虑在发动机自身功率恒定的条件下,由故障引起的静电信号变化的特征参数可用活动率水平(AL)来表述^[14]。AL可以定义为

$$AL = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Q_f^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q_n^2} \quad (1)$$

式中, Q_f 为静电电荷信号; T 为截取的信号长度,通常取为1s; N 为 $Q_f(t)$ 经离散采样后在 T 内的采样点数; Q_n 为 $Q_f(t)$ 经离散采样后的静电电荷信号。AL的物理意义为在一定时间间隔内经过静电传感器探测空间的气路带电颗粒在传感器上激起的感应电荷量的有效值^[14]。

2 航空发动机气路故障静电监测系统的研制

根据静电感应机理,开发了探针式静电监测传感器,如图2所示。传感器采用高温镍基合金作为主要敏感材料,端部设计了安装螺纹,可以直插安装在发动机尾喷口的管壁上,根据尾喷管的直径,可合理设计静电传感器的插入深度,以实现在发动机高温环境下的有效探测。



图2 静电监测传感器

Fig.2 Electrostatic monitoring sensor

本文主要考虑发动机气路部件故障的监测有效性,因此设计了航空发动机气路故障静电监测系统,整个系统由静电监测传感器、电荷放大器、数据采集单元、信号处理与分析软件等组成,系统架构如图3所示。静电传感器采集

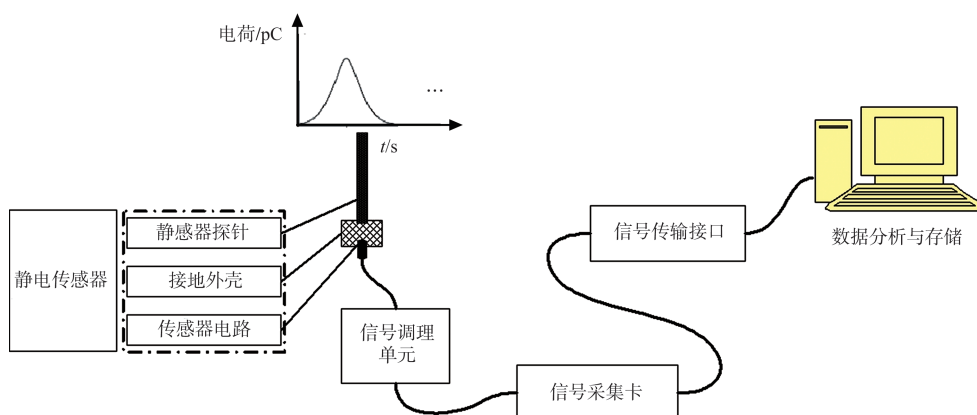


图3 气路故障静电监测系统构成

Fig.3 Composition of electrostatic monitoring system for gas path fault

静电感应信号后,电荷放大器对信号进行滤波、放大处理,电荷放大器通过接线盒与信号采集卡相连,信号采集卡对静电感应信号进行实时采集,并通过机箱卡槽接口传输给控制器,控制器内开发的软件对信号进行存储、分析处理等操作。

系统采用Labview平台开发了静电监测系统软件,主要功能有三个:一是实时采集、存储和显示静电传感器数据,监测指标变化趋势,同时对数据进行总体分析,建立基线,如果趋势异常,则触发报警模块;二是基于监测到的信号对气路部件进行故障诊断和初级分析;三是生成监测与诊断报告。系统运行时,传感器采集到的数据经过处理后,会首先和数据库中的故障特征进行比较,分析总体性能水平变化情况和典型故障匹配情况,并以此来确定气路部件的健康状态。

的燃烧室积炭等,在发动机模拟试验台上设计了故障模式自动化注入装置,可以实现两种故障模式的自动注入、终止、远程控制等功能。



图4 发动机模拟试验台

Fig.4 Aero-engine simulation testbed

3 试验与验证

为了验证所设计静电监测系统的有效性,同时考虑到大型航空涡扇发动机的复杂性和故障注入的难度,因此在自研的航空发动机模拟试验台(见图4)上进行静电监测系统的验证试验。试验台的组成主要包括:(1)由小型涡喷发动机及其控制系统、尾喷管延长管、尾气排放装置、支撑平台等构成的发动机模拟系统,用来模拟真实发动机的尾喷环境^[8];(2)安装于微喷管延长管上的静电传感器和配套的信号处理采集单元及上位机系统,用于采集和处理静电信号;(3)热端部件烧蚀掉块、燃烧室积炭故障模拟装置,用于进行故障模拟。

根据航空发动机常见故障模式的分布情况,选取了两种典型故障模式,包括热端部件烧蚀掉块、不完全燃烧导致

3.1 烧蚀掉块故障注入试验

热端部件烧蚀掉块故障注入试验选用铝粉颗粒作为注入材料,利用注入装置将铝粉颗粒注入涡喷发动机尾喷管道内,在注入装置中放入10g、1mm铁颗粒,涡喷发动机转速稳定在4.5万转左右,系统监测到信号变化情况及其活动率水平分别如图5及图6所示。从图5中可以看出,注入铁粉颗粒后检测到的感应信号幅值发生了明显变化,首先造成感应电压上升为正值,随后又下降为负值,最后恢复至背景信号水平。

3.2 燃烧室积炭故障注入试验

燃烧室积炭故障注入试验选用碳粉作为注入材料,利用注入装置将碳粉颗粒注入涡喷发动机尾喷管道内,在注

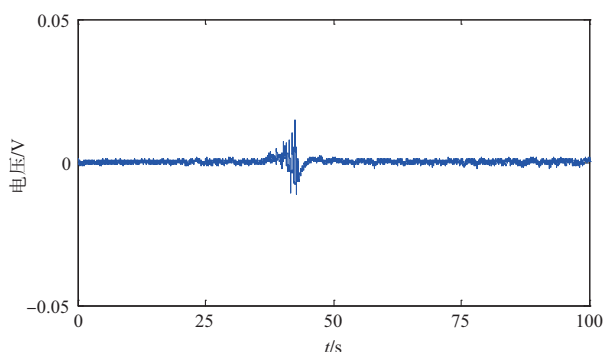


图5 模拟烧蚀掉块故障产生的静电信号

Fig.5 Electrostatic signal generated by burn fragments fault

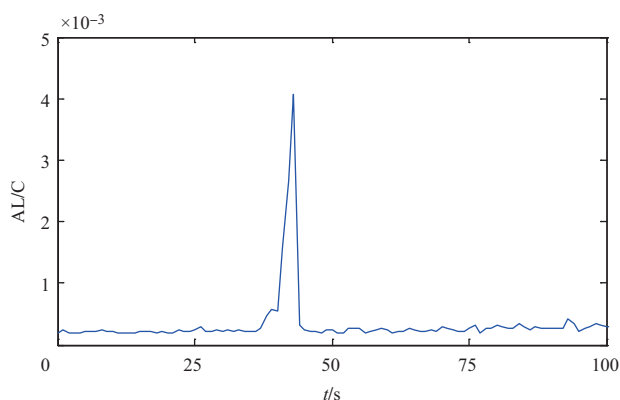


图6 模拟烧蚀掉块故障获取的静电活动率水平

Fig.6 Electrostatic AL generated by burn fragments fault

入装置中放入 10g、200 μm 碳粉颗粒, 涡喷发动机转速稳定在 4.5 万转左右, 系统监测到信号变化情况及其活动率水平分别如图 7 及图 8 所示。从图 7 中可以看出, 注入碳粉颗粒后检测到的感应信号幅值发生了明显变化, 碳粉首先造成感应电压下降为负值, 随后又上升并在横轴两端来回振荡, 最后恢复至背景信号水平。这一方面是由于碳粉与空气摩擦后带负电荷, 另一方面是由于碳粉相对铁粉的密度较小, 因此下降速度较慢。

3.3 试验结果对比及分析

通过对烧蚀掉块故障注入试验及燃烧室积炭故障注入试验的试验结果进行对比分析, 可以看出: (1) 通过分析图 6 及图 8 中的静电活动率水平可以判断出是否发生故障及发生故障的时间。(2) 通过分析图 5 及图 7 中的静电电压信号的幅值变化情况, 可以对两种故障进行区分。图 5 中感应电压先上升为正值, 随后又下降为负值, 最后恢复至背景信号水平; 图 7 中感应电压先下降为负值, 随后又上升并在横轴两端来回振荡, 最后恢复至背景信号水平。通过感应电荷的正负, 可以对两种故障进行区分。由此可以看出, 颗粒

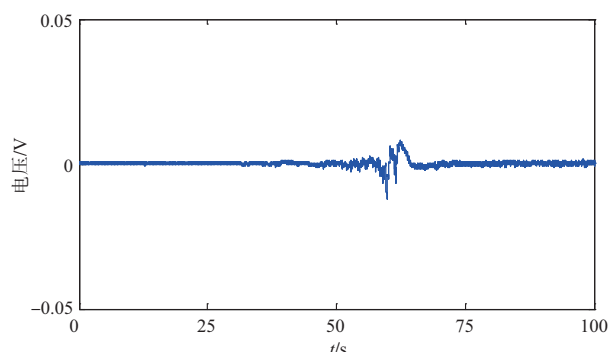


图7 模拟燃烧室积炭故障获取的静电信号

Fig.7 Electrostatic signal generated by combustion chamber carbon fault

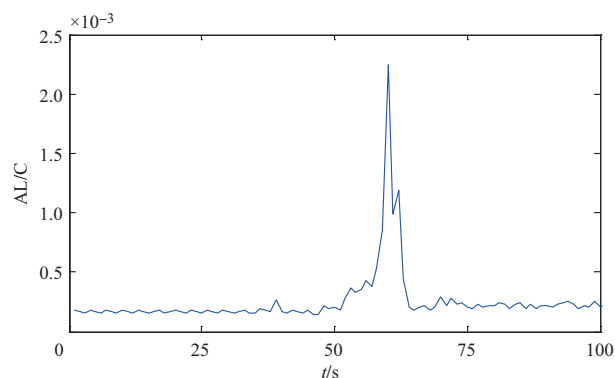


图8 模拟燃烧室积炭故障获取的静电活动率水平

Fig.8 Electrostatic AL generated by combustion chamber carbon fault

的材质对测试的结果存在一定的影响。(3) 对于健康的发动机, 其尾气静电电荷水平只会随着发动机工况的改变而变化。一般采用发动机转速作为发动机工况参数用于分析信号特征, 在本试验中选择了在固定的转速下进行对比试验验证。此外, 静电传感器安装位置及灵敏度等因素也会对测试结果产生影响。因此, 传感器的安装位置应该考虑使尾气处于传感器的灵敏度范围之内。

4 结论

本文通过在自研的航空发动机模拟试验台上进行静电监测系统的验证试验, 验证了探针式静电监测传感器在涡喷发动机上可以有效监测到静电信号, 并能够灵敏反映气路部件的健康状态和发动机工况的变化; 同时, 通过对航空发动机常见的两种典型故障模式(热端部件烧蚀掉块、不完全燃烧导致的燃烧室积炭故障)的模拟, 根据监测到电荷极性的分析可以确定引起静电信号变化的因素有非金属颗粒

和金属颗粒,结合气路部件的材料构成,也可以在进一步分析电荷特性的基础上为故障定位提供依据。

本文在静电监测传感器研制的基础上开展了静电监测系统的试验研究,在小型发动机上的试验结果验证了气路故障静电监测技术的可行性和有效性。考虑到大推重比航空发动机的复杂性,后续应进一步优化系统设计,如提升传感器监测灵敏度、优化故障诊断算法、引入发动机工况参数等,为静电监测技术在航空发动机上的应用奠定基础。

AST

参考文献

- [1] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
Zhang Baocheng. Aero-engine test and measurement technology [M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.(in Chinese)
- [2] Huang Manguo, Liu Wei, Liu Defeng, et al. Design and experiment of test system for simulating aero-engine burn fragments fault[C]//Proceedings of ICFST 2017, 2017.
- [3] Liu Wei, Huang Manguo, Liu Defeng, et al. Design and test of sensor for aircraft engine gas path debris electrostatic monitoring[C]// Proceedings of ICMITE 2017, 2017.
- [4] 韦东豪,文振华,郭霄,等. 面向航空发动机疲劳试验的静电监测方法研究[J]. 航空科学技术,2022,33 (10): 38-44.
Wei Donghao, Wen Zhenhua, Guo Xiao, et al. Research on electrostatic monitoring method for aeroengine fatigue test[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33 (10):38-44. (in Chinese)
- [5] 张寅,胡宇,孙振生,等. 基于混合数学模型的气路静电传感器灵敏度特性分析[J]. 航空科学技术,2021,32(2):22-31.
Zhang Yin, Hu Yu, Sun Zhensheng, et al. Sensitivity analysis of electrostatic sensor in gas path based on hybrid mathematical model[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(2):22-31.(in Chinese)
- [6] Honor P, Ari N. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM[R]. IEEEAC paper-1100, 2006.
- [7] Donald L S, Sanjay G, Michael V. Propulsion control and health management (PCHM) technology for flight test on the C-17 T-1 aircraft[R]. NASA/TM-2004-213303,2004.
- [8] 黄漫国,刘艺,刘太丽,等. 发动机气路故障模拟试验台碰摩故障实验研究[J]. 测控技术,2021,40 (11): 113-117.
Huang Manguo, Liu Yi, Liu Taili, et al. Research on experiments of simulated test desk of engine blade-casing rubbing fault[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40 (11): 113-117.(in Chinese)
- [9] 刘伟,黄漫国,刘德峰,等. 航空发动机气路碎屑静电监测传感器设计与试验[J]. 测控技术,2017,36 (6): 101-104.
Liu Wei, Huang Manguo, Liu Defeng, et al. Design and test of electrostatic monitoring sensor for aircraft engine gas path debris[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36 (6): 101-104.(in Chinese)
- [10] 艾伦·詹巴蒂斯塔,贝蒂·麦卡锡·理查森,罗伯特 C. 理查森. 物理学:电磁学、光学与近代物理[M]. 胡海云,吴晓丽,王菲,译. 北京:机械工业出版社,2015.
Ciambattista A, Richardson B M, Richardson R C. Physics: an integrated approach to forces and kinematics[M]. Hu Haiyun, Wu Xiaoli, Wang Fei.translated. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- [11] 柳迎春,李洪伟,李明. 军用航空发动机状态监控与故障诊断技术[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
Liu Yingchun, Li Hongwei, Li Ming. Military aero-engine condition monitoring and fault diagnosis technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.(in Chinese)
- [12] 文振华,左洪福,李耀华. 气路颗粒静电监测 技术及实验[J]. 航空动力学报,2008,23(12):2321-2326.
Wen Zhenhua, Zuo Hongfu, Li Yaohua. Gas path debris electrostatic monitoring technology and experiment[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12):2321-2326. (in Chinese)
- [13] 张伟. 航空发动机[M]. 北京:航空工业出版社,2010.
Zhang Wei. Aeroengine [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.(in Chinese)
- [14] 李耀华. 静电感应技术在航空发动机气路状态监测上的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
Li Yaohua. Application research of electrostatic induction technique on aircraft engine gas path condition monitoring [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

Research on Electrostatic Monitoring Technology for Fault Diagnoses of Aero-engine Gas Path

Huang Manguo, Liu Defeng, Yan Yu, Gao Yunduan, Zhu Yongbo, Yu Rui

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Special Condition Monitoring Sensor Technology, AVIC Beijing Changcheng Aeronautic Measurement and Control Technology Research Institute, Beijing 101111, China

Abstract: The failure of any part of the aero-engine gas path will seriously affect the performance of the engine, and even cause serious consequences. In this paper, the monitoring technology of engine gas path debris based on electrostatic monitoring mechanism was studied, an aero-engine gas path fault electrostatic monitoring system was designed, and two typical fault simulation experiments were carried out on the engine simulation test-bed. The research shows that the system can judge the fault of the engine gas path components by monitoring the electrostatic level and change rule of the engine exhaust particles, and provide the key technical means for the engine fault diagnosis and health management.

Key Words: fault diagnoses; aero-engine; electrostatic monitoring; gas path fault; sensor