

http://hkxb.buaa.edu.cn hkxb@buaa.edu.cn

文章编号:1000-6893(2012)03-0412-09

涡轴发动机尾气静电监测信号影响因素分析

孙见忠, 左洪福*, 詹志娟, 刘鹏鹏

南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016

摘要: 针对某型航空涡轴发动机试车台实验所获得的尾气静电监测信号, 结合发动机台架试车状态和性能数据, 分别在两个时间尺度上展开分析研究。研究发现发动机的工作状态和健康状态均对尾气静电信号产生重要影响。在小时间尺度上的分析发现, 无故障情况下影响尾气静电信号变化的主要因素为燃油供给量, 尾气静电信号能量随燃油供给量的增加近似按指数规律上升; 而在大时间尺度上的分析发现, 在一定的燃油供给和恒定的自由涡轮转速条件下, 尾气静电信号能量随着发动机性能的缓慢衰退而逐渐上升。实测尾气静电信号所反映的趋势与初步的理论分析结果相一致, 为建立涡轴发动机尾气静电信号的健康“基线”, 进而用于气路状态监测及故障识别提供了初步的依据。研究还发现, 静电监测技术不仅能够对突发性故障提供预警信息, 而且能够反映发动机整机性能衰退, 进一步拓展了静电传感器的监测能力及其在航空发动机健康管理中的应用。

关键词: 静电; 监测; 性能衰退; 发动机健康管理; 气路分析; 涡轴发动机

中图分类号: V231.25

文献标识码: A

航空发动机气路静电监测技术基于静电感应原理对气路带电颗粒进行监测, 实现对气路部件的实时监控。相对于传统的气路静电监测与诊断方法的滞后性, 如气路分析、振动监测等, 需要在故障恶化到一定程度并引起部件几何参数变化时才能探测到故障的存在。气路静电监测是监测气路部件发生故障的直接产物, 能够在故障发生的初期就提供预警信息, 可以实现对气路部件故障, 特别是碰磨、烧伤类故障的实时在线监测和诊断。应用于航空发动机静电监测技术的研究起源于 20 世纪 70 年代的美国空军技术研究所, 经过 30 多年的发展, 该技术已应用在美国联合式战斗机 F35 上, 增强了发动机的故障预测与健康管理能力。目前, 此项技术已被美国列为军事技术并限制出口^[1-4]。

目前国内关于该技术的研究刚刚起步, 南京航空航天大学航空安全与保障技术研究所从 2007 年就开展了基于静电监测的航空发动机健康管理技术研究。前期进行了大量的基础技术研究, 搭建了发动机气路环境模拟实验台, 并初步进行了试车台架实验^[5-7]。本文以某型航空涡轴发动机为监测对象, 结合发动机台架试车状态和性能数据, 对尾气静电监测信号进行分析, 得到了一些初步结论, 为尾气静电信号基线的建立提供了初步依据。研究发现尾气静电信号, 既取决于发动机自身的健康状况, 又与发动机工作状态有关, 因此在处理和分析静电监测信号时, 需要同时考虑发动机工况参数。试车台实测数据分析结果表明, 气路静电监测技术不仅能够对气路部件突发性故障提供预警信息, 而且能够反映涡轴发动机

收稿日期: 2011-04-20; 退修日期: 2011-07-08; 录用日期: 2011-08-21; 网络出版时间: 2011-09-06 11:24

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110906.1124.003.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20110906.1124.003

基金项目: 国家自然科学基金与中国民航联合资助基金重点项目(60939003)

* 通讯作者. Tel.: 025-84893550 E-mail: rms@nuaa.edu.cn

引用格式: Sun J Z, Zuo H F, Zhan Z J, et al. Analysis of factors influencing the exhaust gas electrostatic monitoring signals of a turbo-shaft engine. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(3): 412-420. 孙见忠, 左洪福, 詹志娟, 等. 涡轴发动机尾气静电监测信号影响因素分析. *航空学报*, 2012, 33(3): 412-420.

整机性能衰退,为发动机整机性能退化评估和预测提供了一种新的监测手段。

1 发动机气路静电监测技术

1.1 气路故障静电监测原理

气路静电监测信号与发动机尾气中带电颗粒物有关。在带电颗粒随着尾气排出尾喷管的过程中,带电颗粒在静电传感器周围产生的静电场不断的发生波动,致使静电传感器探极上的感应电荷也在不断的波动,通过信号调理电路将电荷的变化转化为电压信号,输入到数据采集设备,即为现场采集的尾气静电监测信号。

正常情况下发动机尾气中的带电颗粒物主要为碳烟颗粒^[8]。在燃烧室中,碳烟颗粒是在主燃区的局部富油区内生成的,属于一种不平衡生成物,目前化学反应动力学尚无无法解释碳烟颗粒复杂的生成机理。考虑到碳烟颗粒在燃烧室内导致的火焰辐射增大以及随尾气排出后对环境的危害问题,在发动机设计阶段,需采取各种措施以尽量减少发动机冒烟问题。对于一定的燃烧室,尾气中的碳烟颗粒通常维持在较低的水平,且与发动机的工况有关^[9-11]。这些碳烟颗粒带电后随尾气排出,被静电传感器捕捉到,便构成了尾气静电信号的基本成分(或基线)。燃烧室一旦发生故障,如火焰筒壁裂纹、喷嘴积碳等,将会使得燃烧室工作点偏离设计状态,导致碳烟颗粒生成速率增大,引起气路整体荷电水平的上升。此外,叶片碰磨、热段部件烧蚀、材料剥落等都能引起气路荷电水平的升高。因此,如何把因气路部件故障引起的静电信号的变化与基本的背景噪声区分开来,对于气路部件状态监测以及故障识别具有重要意义。

健康的发动机尾气静电信号随发动机工况参数变化在一定的范围内波动,这构成了发动机尾气静电信号的基线,若实测的静电信号偏离这一基线则预示着气路部件可能存在故障,建立准确的基线是正确地进行发动机状态监测和故障识别的前提。

1.2 静电感应信号

静电传感器的输出信号与探极上感应电荷的

一阶导数成正比,而探极上的感应电荷反映了传感器探极敏感空间内的电荷水平^[5]。以一空间点电荷 q 为例,假设电荷以恒速 v 沿直线经过探极附近,探极与电荷运动方向的垂直距离为 h ,设点电荷 q 位于 O 点时 $t=0$,如图1所示。

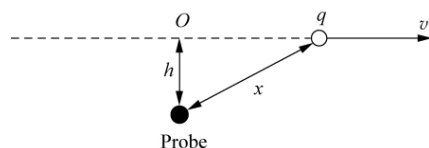


图1 点电荷直线运动经过探极示意图

Fig. 1 Schematic of a single particle charge passing the sensor probe in a straight line

根据高斯定理可得静电传感器表面的感应电荷量 Q 与点电荷 q 的关系为

$$Q = \frac{CAq}{x^2} \quad (1)$$

式中: C 为一常数,与点电荷所在介质的相对介电常数以及传感器探极形状有关; A 为传感器的有效感应面积; x 为点电荷与探极之间的直线距离,根据图1可知,其满足以下几何关系:

$$x^2 = h^2 + (vt)^2 \quad (2)$$

静电传感器的实际输出信号为感应电压,与传感器感应电荷量 Q 的关系为

$$U(t) = RQ'(t) = R \frac{dQ}{dt} = -2RCAqv^2t \cdot [h^2 + (vt)^2]^{-2} \quad t \in [0, \infty) \quad (3)$$

式中: R 为传感器测量电路的等效电阻。由对称性可得,式(3)对于 $t \in (-\infty, 0)$ 也有意义,表示电荷以恒速 v 接近探极。由式(3)可知,传感器输出信号的幅值与带电颗粒的带电量成正比,同时也与带电颗粒的运动速度有关。不同带电量以及运动速度的带电粒子经过传感器附近时,引起的传感器感应电荷及输出信号的变化,分别如图2和图3所示。

由图2和图3可知气路电荷水平和排气速度(即电荷运动速度)的上升都将会引起静电信号幅值的升高。当健康的航空发动机处于稳定工作状态时,其气路中的颗粒物主要为燃油正常燃烧产生的碳烟颗粒。因此,在燃油供给量一定的情况下,气路总体静电荷水平将保持在一个相对稳

定的水平。而当发动机气路部件发生故障时(如燃烧室故障,热端部件的烧蚀、掉块,旋转部件的碰摩等)将会产生大量的异常颗粒,从而导致气路中总体的静电荷水平上升,进而导致静电信号幅值变大。另一方面,涡轴发动机作为热机,在一定的燃油供给情况下,一部分热能被转换成有用功通过功率轴输出,剩余的热能则随着尾气排出而损失掉。即使无故障发生时,发动机在实际使用中也会因为污染、外来物吸入等造成叶片表面光洁度降低和叶型变化,以及碰摩导致叶尖间隙变大等,这些因素都会引起发动机热效率的降低,导致性能缓慢衰退。随着涡轴发动机的性能衰退,在同样的燃油供给量情况下,将有更多热能随着尾气排出而损失掉,引起排气温度以及排气速度的升高,而由图3所示结果可知,排气速度的升高会引起静电信号幅值的上升。

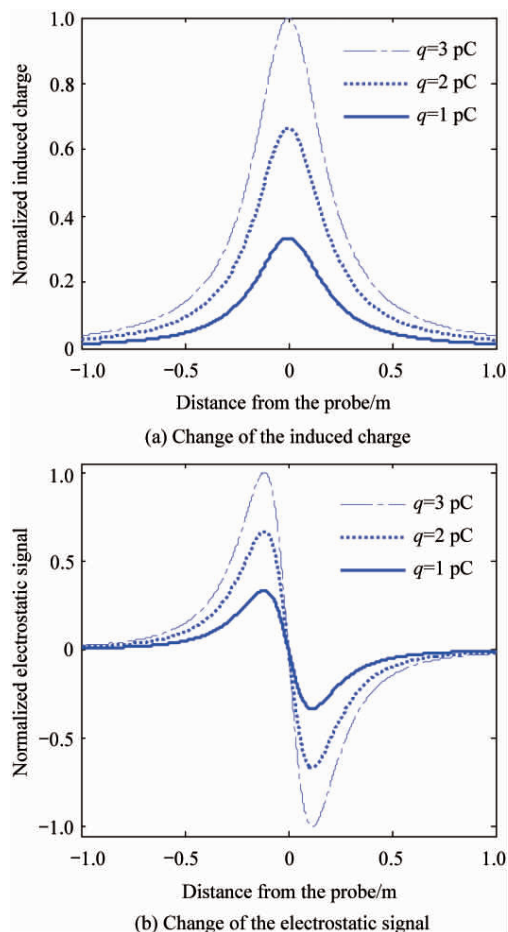


图2 颗粒带电量对感应电荷及静电信号的影响

Fig. 2 Effect of the particle charge on the induced charge and electrostatic signal

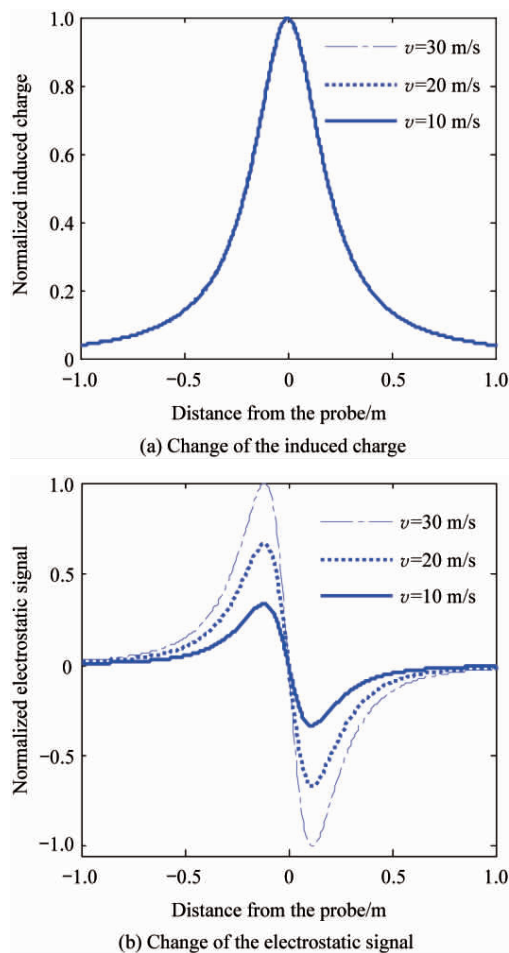


图3 颗粒运动速度对感应电荷及静电信号的影响

Fig. 3 Effect of the particle moving velocity on the induced charge and electrostatic signal

基于以上初步的理论分析,我们可假设在发动机气路部件没有明显故障的情况下,其气路总体静电荷水平取决于燃油供给量。因此,在一定的工况下,即燃油供给量与自由涡轮转速一定的条件下,气路静电荷水平将保持在相对稳定水平,静电监测信号的幅值或均方根值(RMS)的变化反映了发动机的整机性能退化。

2 发动机试车台实验

实验发动机为涡轮轴发动机,由燃气发生器和自由涡轮动力输出装置两大部分组成。其中,燃气发生器由环形进气道、混合式压气机(一级离心式和一级轴流式)、燃烧室和两级燃气涡轮组成;自由涡轮由燃气发生器流出的燃气驱动,燃气经过涡轮后通过引射器排出,自由

涡轮联接一台水力测功机,实验整体方案如图 4 所示^[7]。

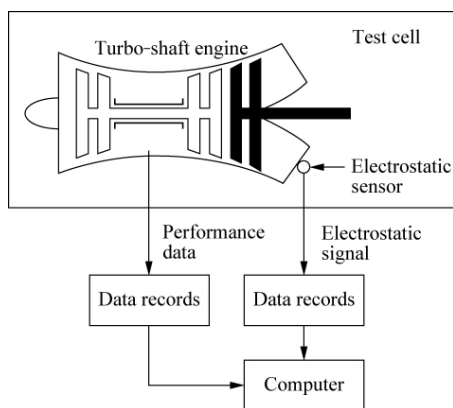


图 4 实验方案^[7]

Fig 4 Experiment setup^[7]

发动机尾气通过两个尾喷管排出,静电传感器安装在其中一个尾喷管出口。发动机每次试车时长为 1 h,称为一个试车阶段,每个试车阶段的试车程序如图 5 所示。静电传感器在每个试车阶段开始前采集信号,停车后停止。同时,通过发动机台架测试系统采集发动机各稳定状态下的状态参数和性能参数。本文研究工作的开展基于实测的尾气静电信号以及相应各试车阶段的状态和性能参数,详细的实验情况参见文献^[7]。

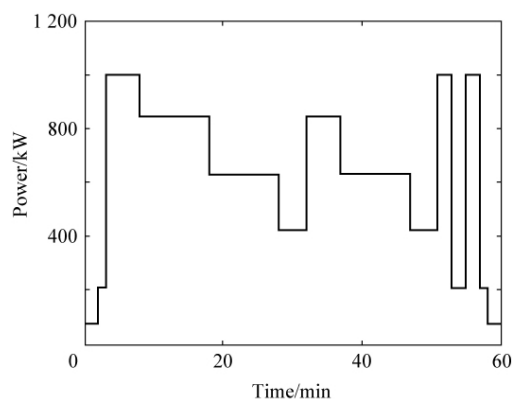


图 5 发动机试车程序

Fig 5 Engine test procedure

3 静电监测信号分析

从发动机试车结束后的分解检查报告来看,该发动机并没有出现部件掉块、碰摩等能够引起

气路静电荷水平显著变化的故障。因此,在整个试车实验中,发动机是工作在相对健康的状态下,决定其气路静电荷水平的主要因素是燃油供给量,而最终实测的气路静电信号还与尾气排气速度以及发动机性能衰退有关。不同于突发性故障,发动机的性能衰退是一个缓慢发展的现象,短时间内或者小时间尺度上(如一个试车阶段内)可以认为发动机性能几乎没有衰退,而从长期来看或大的时间尺度上(如整个试车实验,200 个试车阶段)发动机性能将会缓慢衰退。因此,本文在两个时间尺度上开展分析与处理,分别分析燃油供给量和发动机的性能衰退这两个因素对静电监测信号的影响。

3.1 小时间尺度分析

气路静电监测信号在小时间尺度上的分析,可以认为发动机性能在短时间内(本研究中取一个试车阶段)几乎没有衰退,基本上排除了性能衰退以及故障等对静电监测信号的影响,可集中分析燃油供给量对静电监测信号的影响。图 6 为第 143 试车阶段的静电信号与燃油供给量的对比图,图中燃油供给量为处理后的相对量。

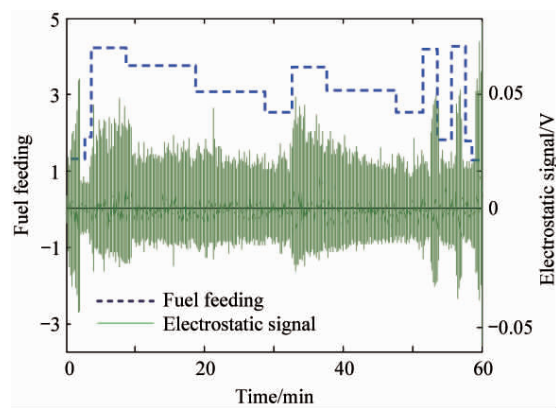


图 6 尾气静电监测信号

Fig 6 Exhaust gas electrostatic monitoring signal

在试车的开始和最后阶段,虽然供油量不大,但由于富油燃烧导致大量的未燃油滴带电后随尾气排出,造成了信号幅值的突然上升。在其他各稳定工作状态下,燃油稳定燃烧,尾气电荷水平保持在稳定水平。由图 6 可见,静电信号幅值的变化趋势与燃油供给量一致,燃油增加信号幅值相应上升。分别提取第 143 次试车的 9 个稳定工作

状态下(其中 1 000 kW 三次, 840 kW、630 kW 和 420 kW 各两次)的燃油供给量和此稳定状态下静电信号的 RMS 值的均值, 并显示在图 7 中。由图 7 可见, 在一个试车阶段内同一功率状态下燃油供给量虽然相近, 但静电信号的 RMS 值仍有差别, 用指数函数来拟合这些点, 可近似得到尾气静电信号的 RMS 值随燃油供给量的变化趋势, 在图 7 中以虚线表示。图 7 中“○”为第 143 试车阶段燃油供给量为 4 时的静电信号 RMS 值。

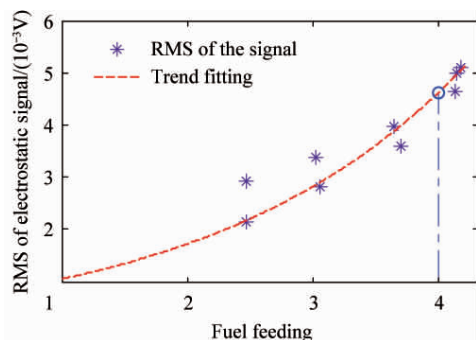


图 7 尾气静电信号 RMS 随燃油供给量的变化趋势

Fig. 7 Trend of RMS value of the exhaust gas electrostatic signal against the fuel feeding

如 1.2 节所述, 处于“健康”状态的发动机, 尾气中带电颗粒主要来自于燃烧生成的碳烟颗粒。影响碳烟颗粒生成因素包括多个方面, 如燃油性质、燃油压力、燃油喷入燃烧室的方式和燃油雾化程度等, 对于特定的发动机这些因素可认为是几乎不变的, 因此, 实际的影响因素是燃烧压力、温度以及油气比等, 而这些因素对碳烟颗粒生成的影响趋势是类似的, 即随着燃油供给的增加, 这 3 个因素会同时上升, 进而导致碳烟颗粒生成速度加快^[10-11], 最终引起气路整体静电水平的上升。另一方面, 燃油供给的增加, 也会引起排气温度及速度的上升。这些因素的综合作用将会引起尾气静电信号的幅值非线性上升。由图 7 可见, 实测的尾气静电信号的 RMS 值随燃油供给量近似按指数规律上升。通过对其他试车阶段的信号进行分析能够得到类似的结论。

在小时间尺度上, 对一台“健康”的发动机通过采集各稳定状态下的静电信号及相应的燃油供给量, 拟合出静电信号 RMS 值随燃油供给量的变化趋势, 可得到一条健康发动机的“基线”(如图 7 中虚线所示)。正常情况下静电信号的 RMS 值

应在以此“基线”为中心的一定的范围内波动, 若偏离过多, 则预示着在同样的燃油供给情况下, 气路中的静电荷水平却有着显著上升。这通常是由于气路部件故障或外来物的吸入造成的, 特别是燃烧室故障, 如喷嘴积碳、燃烧不充分等原因容易造成尾气中碳烟颗粒明显上升, 导致静电荷水平长时间偏离“基线”, 而烧蚀、掉块和碰摩等故障则容易造成瞬时或短时间内的静电信号偏离“基线”。

3.2 大时间尺度分析

气路静电监测信号在大时间尺度上(如整个试车实验周期)的分析, 需要考虑发动机的性能衰退对静电监测信号的影响。如 1.2 节所述, 随着发动机性能的衰退, 在燃油供给一定的情况下, 将会有更多的热能随着尾气排出而损失, 引起尾气温度和速度的上升, 最终导致静电监测信号幅值变大。为了便于分析对比性能衰退对尾气静电监测信号的影响, 本文提取了每个试车阶段在相同的燃油供给量条件下的静电监测信号的 RMS 值, 并分析其变化趋势。

此次发动机台架试车实验中, 总共连续采集了从第 86 到 200 的 115 个试车阶段的尾气静电监测信号, 由于现场传感器线路问题, 实际得到 107 个试车阶段的有效数据。按照 3.1 节所述方法, 提取每个试车阶段内各稳定状态下的静电信号 RMS 值(缺失的数据取前后两个试车阶段的均值来代替), 经拟合得到其随燃油供给量的变化趋势, 进而可得到在任意给定的燃油条件下静电信号的 RMS 值, 如本文研究中提取各试车阶段的燃油供给量为 4 时的静电信号 RMS 值, 并把这些 RMS 值随试车阶段的变化趋势显示在图 8 中。

如图 8 所示, 在相同的燃油供给条件下, 静电信号 RMS 值随试车次数增加振荡上升。试车结束后的发动机拆解检查报告显示, 并没有发现掉块、碰摩等气路部件故障, 因此初步判断静电信号幅值的升高主要是由于尾气排气速度的上升所致。同一台涡轴发动机在同样的燃油供给量条件下随着性能衰退(即热效率的降低)会引起尾气排气速度的升高, 因此其静电信号的 RMS 值间接地反映了发动机整机性能衰退程度。但实际上, 涡轴发动机尾气排气速度还与自由涡轮转速有关, 因此还无法单从静电信号 RMS 值的上升来

判断发动机的性能退化, 需要结合其他的发动机状态参数(如自由涡轮转速)来分析, 如比较在同样的燃油供给量和自由涡轮转速下的静电信号 RMS 值变化趋势。本次地面台架实验中, 我们同时记录了发动机的多种状态及性能参数, 其中包括自由涡轮转速以及功率轴的输出功率, 使得我们得以借助这些状态参数进一步分析和解释尾气静电监测信号所蕴含的有关发动机健康状态信息, 并验证了前面 1.2 节所提出的假设。

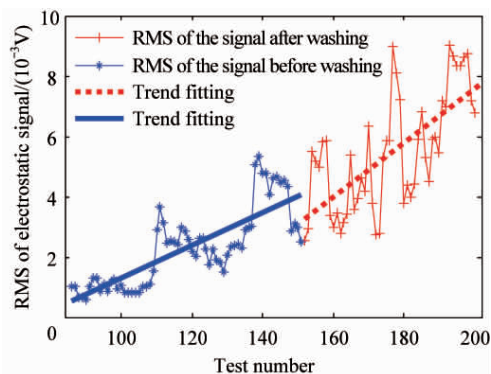


图 8 静电信号 RMS 值随试车阶段的变化趋势

Fig. 8 RMS of electrostatic monitoring signal vs engine test number

涡轴发动机作为热机, 其热效率的降低可作为衡量其性能衰退的一个重要指标。由于涡轴发动机的全部有用功通过功率轴输出, 因此可以采用在一定的燃油供给量下的输出轴功率来衡量涡轴发动机的热效率和性能的衰退。取每次试车中各稳定状态下的燃油供给量与输出轴的功率(如图 9 中“△”所示为第 143 次试车阶段中各稳定状态对应的燃油量及输出轴功率), 两者之间存在明显的线性关系, 拟合这条直线可得在燃油量为 4 时的输出轴功率(图 9 中“○”所示)。在相同燃油供给量的条件下(供油量为 4), 发动机输出轴功率随着试车次数增加的变化趋势如图 10 所示。随着试车次数的增加, 发动机输出轴功率逐渐下降, 反映了整机性能的缓慢衰退。

发动机分别在第 101 次和 151 次试车后进行了水洗, 目的是清除沉积在气路部件上的灰尘和沉积物, 以提高发动机效率。理论上通过合理有效的水洗可以改善发动机性能, 相同燃油供给条件下, 尾气静电监测信号应该相应的有所降低。

从图 10 中可以看出, 第 101 次试车后水洗的效果并不明显, 发动机的性能并没有明显改善。因此, 理论上尾气静电监测信号也应该没有明显变化, 这可以从图 8 所示的实测的静电信号得到印证。同时从图 10 可看出, 第 151 次试车后的水洗效果非常明显, 同样燃油供给的情况下, 输出轴功率有了明显上升, 发动机性能得到了明显改善。因此, 理论上尾气静电信号的 RMS 值相应地应该有明显降低, 但从实测的静电信号(见图 8)可看出, 水洗后静电信号的 RMS 值仅有略微的下降, 也就是说实测的静电信号的 RMS 值明显高于初步的理论分析结果。

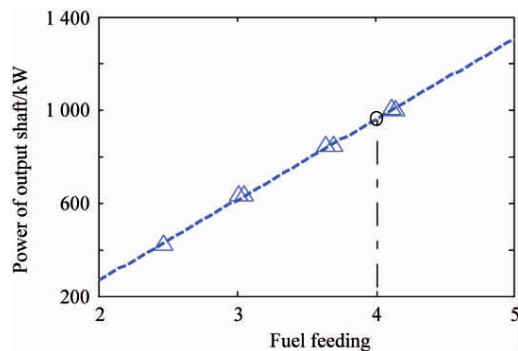


图 9 输出轴功率与燃油供给量的关系

Fig. 9 Relationship between output shaft power and fuel feeding

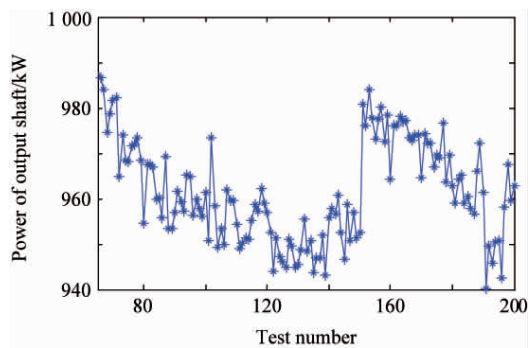


图 10 输出轴功率随试车阶段的变化趋势

Fig. 10 Output shaft power vs engine test number

由 1.2 节静电监测原理分析可知, 有两种情况能够导致这一现象的出现。一种情况是尾气静电水平升高, 在燃油供给量一定的情况下, 尾气静电水平的升高则预示着气路部件发生故障, 即在第 2 次水洗后气路部件可能发生了故障。而从试车实验结束后的拆解报告来看, 并没有发现烧蚀、掉块、碰摩等能够引起尾气静电水平明显上升的

气路部件故障,因此基本上可以排除这一情况。另一种情况就是,尾气排气速度的升高。虽然第2次水洗明显改善了发动机性能,降低了尾气排气速度,但自由涡轮转速也可能影响尾气排气速度。从现场采集的试车数据可知,相比于前面的试车阶段(从第1次到150次试车),在后50次试车中提高了自由涡轮的转速,如图11所示,图中 N 为某一参考转速。

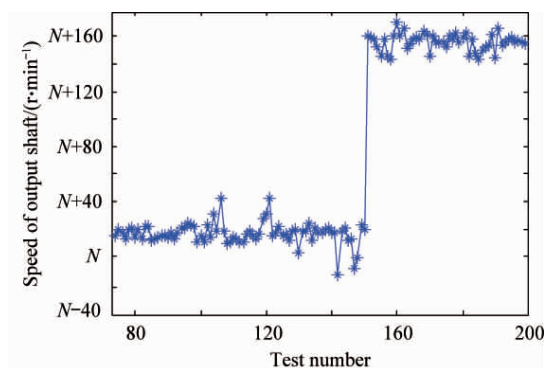


图 11 稳定状态下自由涡轮转速

Fig. 11 Power shaft speed under steady state

笔者分析导致实测的静电信号 RMS 值偏高的主要原因可能是自由涡轮转速提高引起了尾气排气速度上升,进而导致静电监测信号幅值升高。因此,虽然此次水洗明显改善了发动机性能,在同样燃油供给的条件下会使尾气排气速度得以降低,但由于同时又提高了自由涡轮转速,可能导致排气速度升高,两种因素的综合作用,最终导致静电监测信号的 RMS 值相比于水洗前仅有略微下降。在随后的 50 次试车中自由涡轮转速仍然保持恒定,随着试车次数增加,静电信号 RMS 值逐渐上升,反映了发动机性能逐渐衰退。后续试车实验中须进一步研究自由涡轮转速对尾气排气速度及静电监测信号的影响。

4 讨 论

图 12 所示为影响发动机尾气静电信号的主要因素,发动机正常工作时,尾气中带电颗粒主要来自燃油燃烧的产物,即碳烟颗粒。碳烟颗粒主要是碳氢燃料在氧化剂不足的条件下发生不完全燃烧或裂解后产生的一种无定形碳,主要由碳和氢两种元素组成。一般认为碳烟颗粒在燃烧室的主燃区中形成,然后在中间区和掺混区被部分氧

化,其影响因素包括燃油性质、燃烧压力、温度、油气比以及燃油的雾化程度等。目前,碳烟颗粒的生成机理尚未统一,依靠化学反应动力学尚不能充分解释这一复杂现象,因此从理论上直接建模计算或模拟燃烧室碳烟颗粒的生成还有很大困难,但在实验方面,通过直接测量尾气中碳烟颗粒物的浓度,揭示出其与发动机功率状态或燃油供给量具有一定相关性。对于同一型号的发动机,燃油性质以及雾化方式一定,燃烧室压力、温度、油气比以及雾化的程度由发动机工况决定,与发动机燃油供给量有直接关系,因此尾气中碳烟颗粒浓度最终与燃油供给量存在一定的关系,相关实验数据也验证了这一规律。

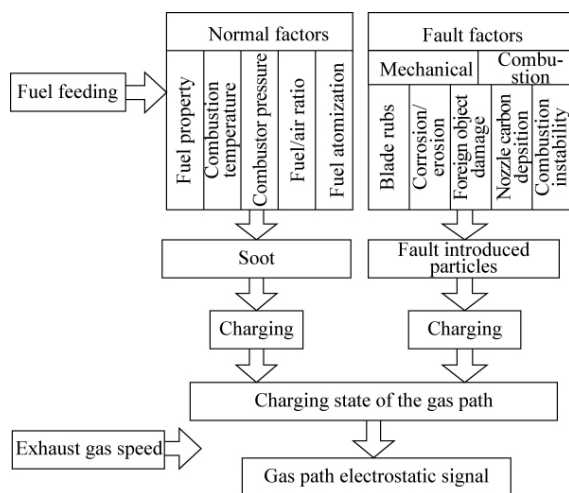


图 12 发动机尾气静电信号影响因素

Fig. 12 Factors influencing exhaust gas electrostatic monitoring signal

文献[12]和文献[13]在涡扇发动机尾气碳烟颗粒物排放测量实验中获得的数据显示,随着燃油供给量增加(功率增大),尾气中碳烟颗粒物浓度或排放指数迅速升高,呈指数上升趋势。文献[12]和文献[13]实验中主要是测量尾气碳烟颗粒物排放浓度,并没有测量其尾气静电荷水平,但随着尾气中碳烟颗粒浓度升高,尾气中总体静电荷水平将会上升。本文实验在涡轴发动机上获得的静电信号显示随着燃油供给量增加,静电信号 RMS 值也随之上升,反映了尾气总体静电荷水平及碳烟颗粒物浓度的上升,这与文献[12]和文献[13]的结论一致。在无故障状态下,燃油供给量对尾气静电水平具有决定性影响,因此本文选择

以燃油供给量为参照来分析尾气静电信号的变化规律,并依此建立发动机尾气静电信号的健康基线。另一方面,现代发动机数据记录仪一般都记录了燃油供给量这一参数,因此从实际工程应用的角度来看,选择燃油供给量作为尾气静电信号分析的参考变量也具有一定的现实意义。

气路部件故障产生的颗粒物是尾气中带电颗粒物的另一个重要来源:机械类故障,如叶片碰摩、烧蚀掉块等,会产生较大的颗粒物,引起尾气静电信号的突变和幅值剧烈升高;燃烧类故障,如喷嘴积碳和腐蚀等喷嘴故障以及燃烧室故障引起的燃烧过程组织不善等,容易造成局部富油,产生了过量的碳烟颗粒,最终导致气路整体荷电水平偏离健康基线。由 2.2 节分析可知,实测的发动机尾气静电信号不仅与尾气整体荷电水平有关,还与尾气排气速度有关,因此在无故障状态下,在燃油一定,即尾气荷电水平无明显变化的情况下,尾气静电信号 RMS 值的缓慢升高反映了发动机性能的衰退,相反活动率水平(AL)这一静电信号特征参数实质上仅反映了尾气荷电水平^[7],而不能反映排气速度的变化,因此也无法反映出发动机性能的退化。

从国外发动机尾气静电监测系统研制到最终装机使用的经验来看,均经过了大量的地面和空中机载实验,其装机使用的可靠性都得到了很好地验证。本文通过在某型涡轴发动机上实际采集的静电信号得出一些基本规律,这些规律对于涡轴发动机来说应该是普适的,但具体的型号应用还需要在此基础上进一步通过地面以及空中机载实验进行验证和总结经验。

5 结 论

1) 静电监测技术作为一种新的航空发动机气路监测技术,其监测信号的解释需借助其他发动机状态和性能参数。

2) 由航空涡轴发动机尾气静电监测信号的初步理论分析结果与实测信号所反映出的趋势相一致,证明了静电传感器在发动机气路监测中的可行性。

3) 小时间尺度上的静电监测信号分析结果显示,尾气静电信号 RMS 值随燃油供给量增加呈近似指数增长的趋势,这为建立发动机静电监

测信号的健康“基线”提供了初步的依据。

4) 大时间尺度上的静电监测信号分析结果显示,在燃油供给量和自由涡轮转速一定的条件下,尾气静电监测信号的 RMS 值随着发动机性能缓慢衰退而呈现出近似线性上升的趋势,为发动机性能衰退监控提供了一种新的方法,也拓展了静电传感器监测能力及其在发动机健康管理中的应用。

参 考 文 献

- [1] Couch R P, Rossback D R, Burgess R W, et al. Sensing incipient engine failure with electrostatic probes. Instrumentation for Airbreathing Propulsion, Proceeding of the Symposium. 1972; 519-529.
- [2] Cartwright R A, Fisher C. Marine gas turbine condition monitoring by gas path electrostatic detection techniques. International Gas Turbine and Aero-engine Congress and Exposition. 1991.
- [3] Powrie H E G, McNicholas K. Gas path condition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine. AIAA-1997-2904, 1997.
- [4] Powrie H E G, Novis A. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM. IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2006.
- [5] Wen Z H, Zuo H F, Li Y H. Gas path debris electrostatic monitoring technology and experiment. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2321-2326. (in Chinese)
文振华,左洪福,李耀华. 气路颗粒静电监测技术及实验. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2321-2326.
- [6] Li Y H, Zuo H F, Wen Z H. Simulated experiment of aircraft engine gas path debris monitoring technology. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 604-608. (in Chinese)
李耀华,左洪福,文振华. 航空发动机气路颗粒静电监测技术模拟实验. 航空学报, 2009, 30(4): 604-608.
- [7] Li Y H, Zuo H F, Liu P P. Gas path electrostatic monitoring of turbo-shaft engine: an exploratory experiment. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11), 2174-2181. (in Chinese)
李耀华,左洪福,刘鹏鹏. 某型航空涡轮轴发动机尾气静电监测探索性实验. 航空学报, 2010, 31(11): 2174-2181.
- [8] Sorokin A, Arnold F. Electrically charged small soot particles in the exhaust of an air craft gas turbine engine combustor: comparison of model and experiment. Atmospheric Environment, 2004, 38(17): 2611-2618.
- [9] Yan C J, Fan W. Combustion. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)

- 严传俊, 范玮. 燃烧学. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [10] Jin R S. Gas turbine combustion chamber. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1988. (in Chinese)
- 金如山. 航空燃气轮机燃烧室. 北京: 宇航出版社, 1988.
- [11] Lefebvre A H. Gas turbine combustion. Washington D. C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [12] Doppelheuer A, Lecht M. Influence of engine performance on emissions characteristics. Symposium of the Applied Vehicle Technology Pane-gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels. 1998.
- [13] Beyersdorf A, Anderson B. An overview of the NASA alternative aviation fuel experiment (AAFEX). Interna-

tional Conference on Transport, Atmosphere and Climate. 2009.

作者简介:

孙见忠 男, 博士研究生. 主要研究方向: 航空发动机健康管理与维修工程。

Tel: 025-84895772

E-mail: sunjianzhong@nuaa.edu.cn

左洪福 男, 教授, 博士生导师. 主要研究方向: 可靠性工程、维修理论、故障诊断与监控等。

Tel: 025-84893550

E-mail: rms@nuaa.edu.cn

Analysis of Factors Influencing the Exhaust Gas Electrostatic Monitoring Signals of a Turbo-shaft Engine

SUN Jianzhong, ZUO Hongfu^{*}, ZHAN Zhijuan, LIU Pengpeng

College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: Based on the exhaust gas electrostatic monitoring signals of a turbo-shaft engine, an analytical study is carried out in combination with other engine operating parameters on two time scales. The results presented in this study show that both the engine operating condition and health status have a significant effect on the monitored exhaust gas electrostatic signal. On the small time scale, for an engine without fault the major factor that may cause change in the electrostatic signal is fuel delivery, and the energy of the signal will increase almost exponentially with more fuel feed. On the large time scale, given a constant fuel delivery and power shaft speed, the energy of the exhaust gas electrostatic signal will increase as the engine deteriorates gradually. The trend extracted from the monitored signal is in agreement with the theoretical analysis, which may serve as an initial basis for the establishment of a base line in the electrostatic signal, and in turn facilitate further application, such as to gas path component condition monitoring and fault identification. The research also demonstrates that the electrostatic monitoring technique can not only provide a precursor for the impending fault, but also track the gradual performance degradation for a turbo-shaft engine, and this may mean an extension of the capacity and application of the electrostatic monitoring sensor in engine health management.

Key words: electrostatics; monitoring; performance deterioration; engine health management; gas path analysis; turbo-shaft engine

Received: 2011-04-20; Revised: 2011-07-08; Accepted: 2011-08-21; Published online: 2011-09-06 11:24

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20110906.1124.003.html DOI: CNKI:11-1929/V.20110906.1124.003

Foundation item: National Natural Science Foundation of China and Civil Aviation Administration of China (60939003)

^{*} Corresponding author. Tel.: 025-84893550 E-mail: rms@nuaa.edu.cn