

文章编号:1000-8055(2013)02-0473-08

涡喷发动机尾气静电监测及气路故障特征

刘鹏鹏, 左洪福, 付 宇, 孙见忠

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘 要: 利用涡喷发动机试车台和新研制的小型涡喷发动机完成了一系列静电监测实验, 获取了涡喷发动机尾气静电信号特性, 并通过分析静电信号特征证实了尾气静电监测技术对发动机气路部件机械故障的监测。研究发现发动机尾气静电信号的细微变化与发动机工况相关, 通过分析第 102 试车阶段的静电信号发现活动率水平出现了与发动机工况同步变化的情况, 验证了活动率水平是一种可作为表征尾气中微小颗粒的带电情况的特征参数; 在 102~108 试车阶段中, 发动机出现了燃烧室内壁积炭、燃烧室内壁轻微烧蚀和气路润滑油泄漏故障, 根据静电信号的统计分析以及大时间尺度的趋势分析, 发现活动率水平、正(负)事件率可作为预警参数来反映因这些故障而导致尾气静电整体水平的变化。

关 键 词: 涡喷发动机; 气路; 尾气; 状态监测; 静电感应; 信号特征; 机械故障

中图分类号: V231.25

文献标志码: A

Exhaust gas electrostatic monitoring and gas path fault feature for turbojet engine

LIU Peng-peng, ZUO Hong-fu, FU Yu, SUN Jian-zhong

(College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Some experimental stages of electrostatic monitoring explorative experiments which used the engine test bed and a certain small turbojet engine were conducted. The characteristics of electrostatic signal of the turbojet engine's exhaust gas were obtained, and the electrostatic monitoring technology's ability of monitoring the engine gas path mechanical faults was verified. Then, the result of the next research shows that electrostatic signal of the turbojet engine's exhaust gas may change a little with the engine conditions. There are some evidences obtained by the analysis of the electrostatic signal in stage 102 showing that the activity level changes with the engine conditions, and the activity level is a characteristic parameter of the charged micronized particles in the turbojet engine's exhaust gas. In the process of engine test from stage 102 to stage 108, there were some faults such as engine combustion chamber carbon deposition fault, mild ablation breakdown and lub oil leaking in gas path. There were some changes in electrostatic whole level of engine's exhaust gas which can be found by analyzing signal statistical and long time domain to make characteristic parameters of the electrostatic signal like active level and positive (negative) event rate as early-warning parameters corresponding with these faults.

收稿日期: 2012-02-27

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130131.0829.201302.473_032.html

基金项目: 国家自然科学基金与中国民航联合资助基金(60939003); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX12_0164)

作者简介: 刘鹏鹏(1987—), 男, 山东临沂人, 博士生, 主要从事先进传感器技术、航空发动机状态监测与故障诊断、发动机系统测试性与故障预测等研究。

Key words: turbojet engine; gas path; exhaust gas; state monitoring; electrostatic induction; signal characteristics; mechanical fault

航空涡喷发动机静电监测技术是一种基于静电感应的发动机气路故障监测技术. 该技术利用静电传感器获取发动机气路静电荷整体水平的变化情况, 实现对气路部件早期故障监测.

Cartwright 等对该技术进行了大量的研究工作并获取了一些研究成果^[1-2]. Powrie 和 Fisher 简要总结了开展地面模拟实验的结果^[3], 讨论了实验目的和一些关键问题, 分析了气路静电监测系统作为预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM) 传感器在实际应用中可能遇到的各种因素^[3-4]. Fisher 等描述了颗粒静电监测技术的相关实验, 简要介绍了该项技术最终在 F-35 战斗机上进行的实施和集成情况^[5-8]. Lapini 等^[9]利用一台重度污染的发动机开展了对气路部件的故障监测与预警的研究. Wilcox 等^[10]研究了静电监测技术在工业燃气涡轮发动机中的应用问题, 着重讨论了静电传感器的安装问题, 获取了不同安装位置的信号特征等.

目前, 国内关于航空发动机尾气静电监测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 年开始开展了基于静电感应原理的发动机故障监测技术研究, 主要侧重于监测原理和实验研究, 文振华等^[11-13]开展了气路静电监测技术原理研究, 用有限元方法对气路静电传感器感应特性进行仿真研究, 并研究了一些静电信号特征提取方法, 最后在尾气静电监测模拟环境中进行了静电传感器可行性验证实验. 李耀华等^[13]讨论了基于静电感应原理的航空涡轴发动机监测技术, 完成了对某型涡轴发动机尾气静电监测的地面实验. 孙见忠等^[14]利用测得

的实验数据分析了涡轴发动机尾气静电信号的影响因素.

与航空涡轴发动机相比, 航空涡喷发动机具有排气速度快、尾气温高等特点. 本文利用某型涡喷发动机的试车台, 进行了航空涡喷发动机尾气静电监测研究, 验证了具有自主知识产权的静电传感器及处理方法应用于涡喷发动机尾气静电监测的有效性, 获取了涡喷发动机尾气静电信号的一些特性. 同时还验证了研制的静电监测技术可以监测到气路润滑油泄漏、发动机燃烧室存在的积炭故障以及燃烧室壁轻微烧蚀而产生的异常尾气静电信号 (润滑油泄漏故障经试车过程中的目视检查发现、发动机燃烧室积炭故障与燃烧室壁轻微烧蚀经发动机分解后发现, 可用静电信号的特征进行对比). 文中的研究为开展基于静电感应的尾气静电监测技术的研究以及将相关研究应用于某型号航空涡喷发动机提供一些理论依据与实验探索.

1 航空涡喷发动机尾气静电监测原理

航空涡喷发动机尾气静电监测原理如图 1 所示. 发动机的尾气中含有大量带电离子、带电颗粒^[15-16], 这些带电物质经过安装在发动机尾喷管出口的静电传感器时, 将会在传感器探针表面上感应出极性相反的静电感应电荷. 传感器探针在极短的时间内达到电荷平衡, 传感器探针可视作等势体, 信号采集设备可以采集相应的电压信号, 信号采集与处理系统完成信号调理并提取信号特征.

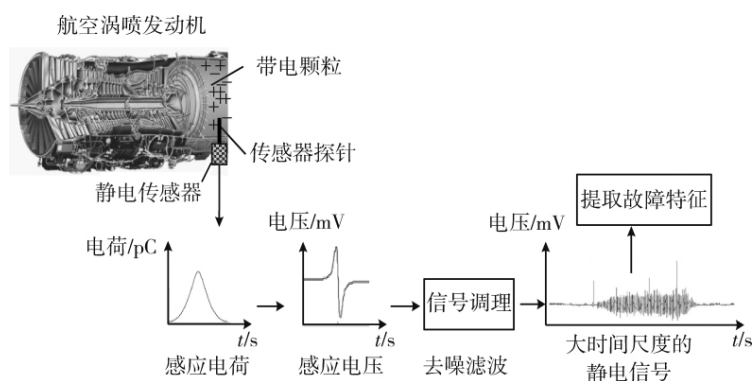


图 1 航空涡喷发动机静电监测原理

Fig. 1 Electrostatic monitoring principle of turbojet engine

对于健康的航空涡喷发动机, 在外界条件一定的情况下其尾气静电水平只会随着发动机工况的变化而变化, 静电水平在各工况对应的正常范围内波动。当航空涡喷发动机气路部件出现某些故障时, 因故障产生的颗粒物增多会造成静电水平超出正常范围, 并出现与故障对应的特殊静电信号, 这些信号都会被静电传感器所感应到。

2 尾气静电监测实验过程

2.1 实验方案

本实验采用了某型航空涡喷发动机为实验对象, 该涡喷发动机是新研制成功的小型高速涡喷发动机, 实验使用的主要设备包括自行研制的静电传感器、具有屏蔽作用的信号线、数据采集卡(采样精度为 24 bit)、尾气静电监测系统(利用 LABVIEW 编译, 设定采样率为 2 kHz)、计算机等。实验过程中可以实时显示和保存采集到的尾气静电信号。

在实验过程中, 发动机安装固定在试车台架上, 静电传感器安装在尾喷管出口处, 信号采集系统放置在控制室中并通过有屏蔽功能的信号线与静电传感器相连, 整体实验方案如图 2 所示。

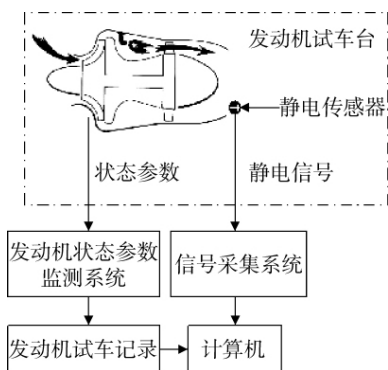


图 2 航空涡喷发动机尾气静电监测整体实验方案

Fig. 2 Whole scheme of turbojet's exhaust gas electrostatic monitoring experiment

2.2 静电传感器及其安装

本实验选用探针式静电传感器, 其感应原理如图 3 所示, 当带电物质经过静电传感器的测量空间时, 将会在传感器探针上感应出极性相反的静电感应电荷。

实验中选用的感应探针由镍合金不锈钢制成, 传感器外壳为不锈钢, 起到隔热和电磁屏蔽作用。内部绝缘材料为微晶玻璃陶瓷, 能够承受 800 °C 的高温, 可以有效保护内部电路(发动机尾气历史

实测温度不会长时间超过 800 °C)。探针式静电传感器在发动机试车台的实际安装情况如图 4 所示。

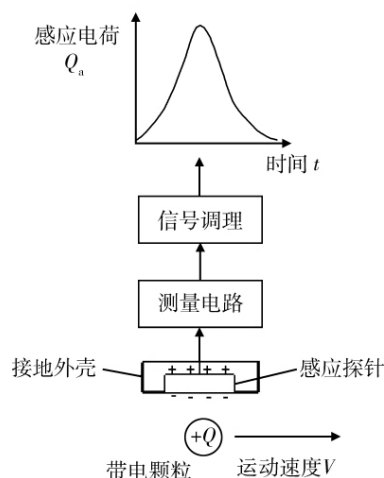


图 3 探针式静电传感器感应原理

Fig. 3 Inducing principle of electrostatic sensors with probe

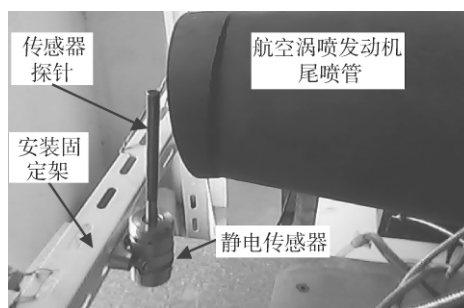


图 4 静电传感器的安装位置

Fig. 4 Installation position of electrostatic sensor

2.3 发动机地面台架实验试车程序

每一个实验阶段持续的时间为 63 min 左右。每次实验需要严格按照试车程序完成一个完整试车阶段, 然后控制发动机停车并等待润滑油温度降到规定值, 并且完成润滑油过滤以及添加等规定工作后, 开始下一阶段的试车。尾气静电监测系统在每个阶段开始时采集静电信号, 停车至转子转速降为 0 时停止。静电监测从发动机地面试车第 101 阶段开始, 采集到第 110 阶段, 共获得了 10 个阶段的静电信号监测以及获取各阶段的相关试车记录参数, 作为后期分析的依据。在 10 个阶段后, 对发动机进行了分解分析, 分解时间以及所作的工作都被记录保存, 这些将作为检验静电信号所反映的发动机存在的问题是否准确可行的依据。

每一个试车阶段分为约 22 个小阶段, 试车程

序如图 5 所示,其中对转速原始数据做了等比例降低的处理。

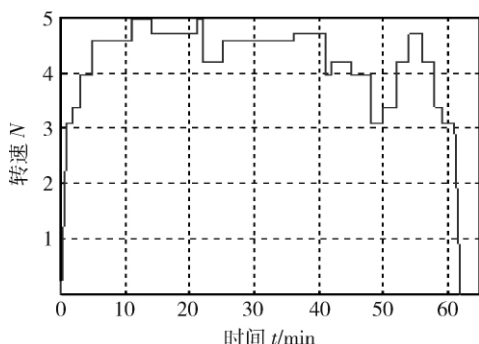


图 5 发动机地面台架实验试车谱

Fig. 5 Experimental spectrum of engine on ground test bed

3 原始静电信号与预处理

3.1 原始静电信号

本航空涡喷发动机尾气静电监测实验在第 110 阶段结束后暂停实验,对发动机进行分解分析,获取了第 101~110 阶段的某型航空涡喷发动机尾气静电信号,其中第 101 阶段进行了整个静电监测系统调试,故测得的数据舍弃不用;第 109 阶段和第 110 阶段对新研制的环状静电传感器进行了可行性测试,故在本文的静电信号分析中舍弃不用。本文采用的实验数据为第 102~108 阶段测得的数据,总共 7 个阶段的静电信号,以第 102 阶段为例,该阶段原始静电时域信号如图 6 所示。

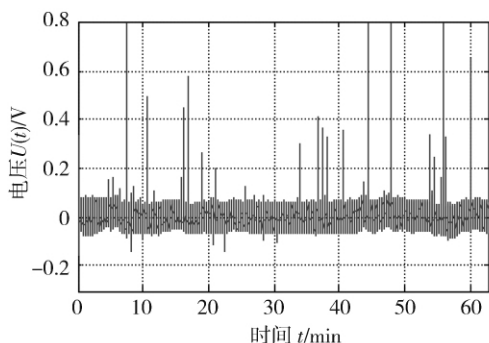


图 6 第 102 阶段的航空涡喷发动机尾气原始静电信号

Fig. 6 Primitive electrostatic signal of turbojet exhaust gas in stage 102

从图 6 可以看出第 102 阶段的航空涡喷发动机尾气原始静电信号随发动机工况改变发生了一些细微的变换,但是信号中出现了一些突变脉冲成分,对应的异常点幅值比正常信号的幅值大很

多,异常点的出现不存在规律性,突变脉冲幅值呈离散分布。

3.2 原始静电信号预处理

航空涡喷发动机尾气中的带电物质在静电传感器探针上的感应电荷量记为 $Q(t)$, 尾气静电信号采集系统获得的静电信号为电压信号,记为 $U(t)$ 。

尾气静电信号采集系统的初始状态为 0, $Q(t)$, $U(t)$ 经过拉普拉斯变换后分别为 $Q(s)$, $U(s)$, 两者之间的关系为

$$U(s) = R \cdot s \cdot Q(s) / (R \cdot C \cdot s + 1) \quad (1)$$

当 $R \cdot C \cdot s \ll 1$ 时,信号测量模型等效为

$$U(t) = R \cdot Q'(t) \quad (2)$$

尾气静电信号采集系统测得的原始静电信号为电压信号 $U(t)$, 且 $U(t)$ 与传感器探针上感应电荷 $Q(t)$ 的 1 阶导数成正比,在进行信号分析时需要进行预处理,将电压信号积分变换为电荷信号。

4 静电信号处理与分析

4.1 静电信号特征参数

静电信号除了具有时域统计特征参数,还存在着独有的特征参数,包括活动率水平、正事件率、负事件率等。

4.1.1 活动率水平

活动率水平可以定义为

$$A(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Q_i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Q_{in}^2} \quad (3)$$

其中 Q_i 为经过去噪滤波处理的感应电荷信号, T 为截取的信号长度,通常取为 1 s, N 为 $Q_i(t)$ 经离散采样后在 T 内的采样点数, Q_{in} 为 $Q_i(t)$ 经离散采样后的感应电荷信号。活动率水平的物理意义可以理解为在一定时间间隔内经过静电传感器敏感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。

4.1.2 事件率

事件率的定义为

$$E(t) = \frac{M}{N} \times 100\% \quad (4)$$

其中 M 是每一个 A 点对应的静电信号间隔(1 s 信号)中超过 A 点值 K 倍的点的个数, K 为经验倍数, N 为该段信号中总采样数。事件率是以百分比表示的,按照静电电荷信号的正负分别计算为正事件率和负事件率。事件率的物理意义可以理解为在一定时间间隔内总采样点与信号异常个

数的百分比。

4.2 典型静电信号分析与处理

利用极差变换法将按公式(5)计算出的所有活动率水平值进行归一化处理, 将各个时间段对应的活动率水平值均转变为属于 $[0, 1]$ 区间的值, 但并不改变各活动率水平之间的相对关系, 不会影响到数据特征。

转化步骤为: 首先寻找活动率水平值中的最大值和最小值; 然后按照公式

$$A'(t) = \frac{A(t) - \min[A(t)]}{\max[A(t)] - \min[A(t)]} \quad (5)$$

将 $A(t)$ 转化为归一化后的参数 $A'(t)$, 以102阶段为例, 得到的归一化活动率水平如图7所示。

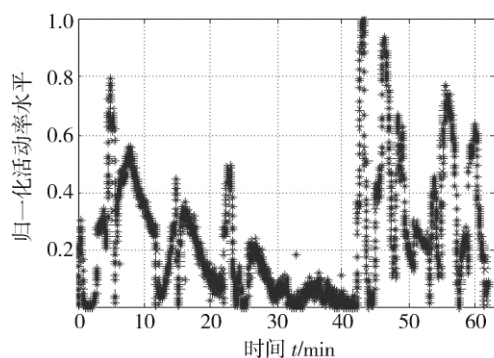


图7 第102阶段中尾气静电信号的活动率水平

Fig. 7 Active level of electrostatic signal of the exhaust gas in stage 102

根据图5和图7可以看出归一化的活动率水平随着发动机工况变化存在着几乎同步变化的趋势, 这说明发动机工况是影响活动率水平变化的主要原因, 因为发动机工况与碳烟颗粒等微小颗粒的生成密切相关, 从而可以证明活动率水平主要是反映尾气中微小颗粒的带电情况、质量浓度等。

根据计算的活动率水平值和公式(4)计算出整个试车阶段的正、负事件率的变化情况分别如图8和图9所示。

正、负事件率可以反映发动机尾气中带电颗粒所带的静电电荷的极性, 也可以通过正、负事件率的幅值反映带电荷量的大小, 正事件率一般反映尾气中较大的非金属颗粒带电情况, 而负事件率反映尾气中较大的金属颗粒带电情况^[2]。

从图8可以看出较大的正事件率值出现比较集中, 主要集中在有限的几个区域, 呈现出离散、非周期特性。另外, 通过对比图5可以发现正事件

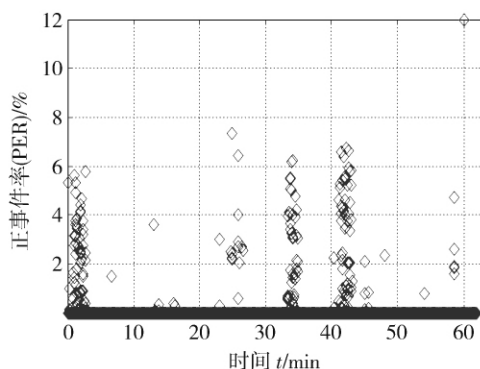


图8 第120阶段中尾气静电信号的正事件率

Fig. 8 Positive event rate of electrostatic signal of the exhaust gas in stage 120

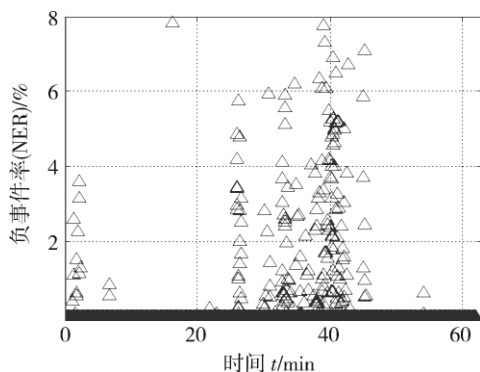


图9 第120阶段中尾气静电信号的负事件率

Fig. 9 Negative event rate of electrostatic signal of the exhaust gas in stage 120

率变化情况与发动机的工况并不存在着相关性, 可知较大的正事件率值的出现与试车程序的变化无关, 不是由于试车程序的改变而引起的。第102试车阶段中这些正事件率主要反映了发动机燃烧室中生成的积炭颗粒情况, 根据发动机的车间分解报告可以证实这一点, 发动机燃烧室内存在积炭, 而正事件率的出现很有可能就是燃烧室内的积炭脱落或燃烧不良产生的较大碳烟颗粒引起的, 正事件率的最大值出现在第102阶段第60 min左右, 达到了12%。

在图9中负事件率的出现集中在了2个区域, 其中第1个区域的负事件率最大值为3.76%, 范围比较窄, 第2个区域的负事件率最大值为7.89%, 持续的范围比较大, 通过与图5比较分析可以发现集中出现在发动机转速最高、持续时间最长的这一区域内, 负事件率的变化情况也存在着离散、非周期特性, 但是负事件率整体并不是很大, 说明尾气中金属颗粒数量很少。通过发动机分解报告发现燃烧室存在着局部轻微烧蚀现象, 可

能的故障原因是在发动机高转速时燃烧室温度比其他试车阶段要高,气流速度加快;同时,由于燃烧室壁积炭的存在,又会导致燃气温度分布不均,极易引起局部过热现象。这些因素的共同作用使得发动机尾气中出现了少量的金属颗粒,通过分解分析与检查可以确定与燃烧室材料烧蚀丢失相关,并且分解后检查没有发现明显的磨损类故障。

5 静电信号随试车阶段数变化趋势分析

对第102~108阶段总共7个阶段的静电信号分别按照第3节中对第102阶段的处理方法进行处理,可以获取静电信号随试车阶段数在大时间尺度上的变化趋势。另外还分析了第102~108阶段的静电信号对应于转速的变化趋势。

5.1 活动率水平变化趋势

将第102~108阶段的活动率水平进行归一化处理后,得到的结果如图10所示,从图中可以看出活动率水平在每个试车阶段都会有波动,这个在以第102阶段为例的分析中已经做了说明,主要是因为尾气中的静电信号会受到发动机工况的影响,每个试车阶段都包括了不同的发动机工况,所以活动率水平呈现出波动;第102~105阶段静电信号的活动率水平的变化情况比较平稳,只出现了少量的异常点,而第106阶段活动率水平出现了较大幅度的增加并伴随着大量异常点的出现,可能原因是由于更换的起动发电机处密封不严导致部分润滑油泄漏到气路中(由于该小型涡喷发动机结构简单,附件箱尺寸有限,起动发电机安装在发动机进气道中)。泄漏的润滑油随着高速气流进入了发动机燃烧室参与燃烧反应,一定程度上影响了发动机的燃烧性能,导致了活动率水平升高,而较多的异常点是表示较大的碳颗粒的出现,此实验阶段后拆卸下了起动发电机并更换了密封圈,重新安装了起动发电机,保证了该故障的排除;从图10中可以看出活动率水平在每个试车阶段都会有波动,这个在以第102阶段为例的分析中已经做了说明,主要是因为尾气中的静电信号会受到发动机工况的影响,每个试车阶段都包括了不同的发动机工况,所以活动率水平呈现出波动;第102~105阶段静电信号的活动率水平的变化情况比较平稳,只出现了少量的异常点,而第106阶段活动率水平出现了较大幅度的增加并伴随着大量异常点的出现;第107~108阶段的

静电信号活动率水平较第106阶段出现了下降,但是整体比第102~105阶段的活动率水平要高,而且出现的异常点数量增多,但是异常点的幅值比第106阶段异常点的幅值普遍要小,原因是在第107~108阶段燃烧室受到使用时间以及润滑油参与燃烧的影响,导致燃烧性能较第102~105阶段出现了下降。

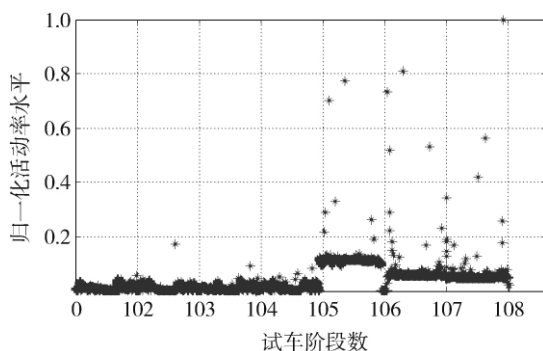


图10 第102~108阶段的活动率水平变化趋势

Fig. 10 Trend of active level from stage 102 to stage 108

5.2 正事件率变化趋势

第102~108阶段正事件率变化情况如图11所示。

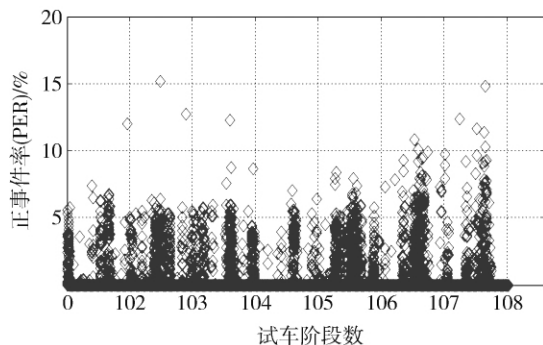


图11 第102~108阶段的正事件率变化趋势

Fig. 11 Trend of positive event rate from stage 102 to stage 108

第102~105阶段正事件率大多保持在6%左右,同时伴随着一些幅值较大的异常点,发动机工作过程中气路中有较大粒径的非金属颗粒(较大的碳烟颗粒或极小的积炭颗粒脱落)。由于发动机起动发电机安装不当导致部分润滑油泄漏到气路中,润滑油参与燃烧,一定程度上影响了发动机的燃烧性能并且可以产生大量粒径较大的碳烟颗粒,所以第106阶段正事件率的数据点密度较大,

但是数据点的值并不大.在图11中,可以明显地看出第102~108阶段的正事件率具有升高的趋势.

5.3 负事件率变化趋势

第102~108阶段的负事件率的变化趋势如图12所示.第102~105阶段的负事件率保持在7.5%,几乎不存在异常点;第106~108阶段的负事件率出现了升高的趋势,而且同样几乎不存在异常点.从整体趋势来看,第102~108阶段负事件率呈现出了上升趋势,同时也可以发现负事件率的变化趋势和正事件率的变化趋势极为相似,可见在发动机尾气中的金属颗粒也出现了逐渐增多的趋势.

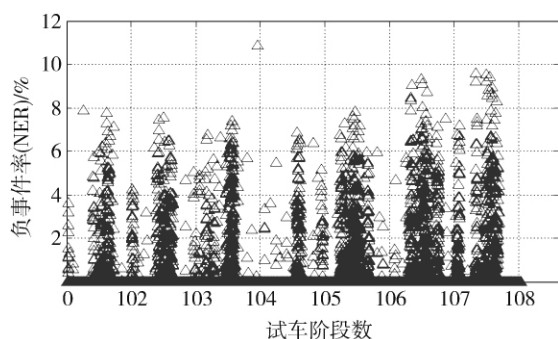


图12 第102~108阶段的负事件率变化趋势

Fig. 12 Trend of negative event rate from stage 102 to stage 108

6 结论

本文中介绍了利用发动机试车台进行了对某型航空涡喷发动机尾气静电监测研究的基本情况.在试车过程中出现了因发动机的起动发电机安装不当而导致部分润滑油泄漏,并且通过对完成第110阶段的地面台架实验后的发动机的分解发现该航空涡喷发动机在燃烧室内壁出现了大量积炭、燃烧室局部轻微烧蚀.因这些故障引起的尾气静电异常情况在静电信号的特征参数中有所体现,通过本实验得出的主要结论有:

1) 所研究的静电传感器及处理方法应用于航空涡喷发动机尾气静电监测时具有有效性,可以应用于高温、高速尾气的静电监测,证明了该项技术在涡喷发动机上的应用具有可行性.

2) 静电监测时域信号中出现了一些幅值很大的异常点,通过分析可以发现时域信号特征可以反映发动机尾气中出现的粒径较大的颗粒.

3) 通过对原始静电信号时域信号与发动机各工况参数曲线(航空发动机试车谱)进行同一时

间轴的对比分析,发现信号时域波形会随着发动机工况的改变产生细微波动.

4) 以第102阶段的尾气静电信号作为典型信号计算出静电信号的活动率水平、正事件率和负事件率,发现活动率水平随着发动机工况(发动机试车谱)变化存在着几乎同步变化的趋势,这说明了发动机工况是影响活动率水平变化的主要原因,证明活动率水平主要是反映尾气中微小颗粒的带电情况、质量浓度等;该阶段中较大的正、负事件率值集中在几个有限的区域,呈现出离散、非周期特性,通过与发动机分解报告相验证可以确定这些正事件率主要是反映了发动机燃烧室中生成的较大碳烟颗粒或积炭颗粒脱落的情况,负事件率是由燃烧室局部轻微烧蚀导致材料丢失造成的.

5) 第106阶段活动率水平出现了较大幅度的增加并伴随着大量异常点的出现,可能原因是由于发动机起动发电机安装不当,密封圈处部分润滑油泄漏到气路中,随着高速气流进入了燃烧室中参与了燃烧反应,一定程度上影响了发动机的燃烧性能.通过连续分析第102~108阶段的静电信号的活动率水平,正、负事件率的变化趋势发现:在这一系列阶段中活动率水平,正、负事件率随着阶段数的增加都整体呈现出升高的趋势,但是存在着一些幅值较大的异常点,数据点密度有所改变.同时也可以发现正、负事件率的变化趋势极为相似,两者应存在着相关性.可能原因是燃烧室温度分布不均引起了燃烧室局部轻微烧蚀(少量金属材料丢失)故障,所以正、负事件率的变化趋势较为相似.

参考文献:

- [1] Cartwright R A, Fisher C. Marine gas turbine condition monitoring by gas path electrostatic detection techniques [R]. ASME Paper 91-GT-376, 1991.
- [2] Powrie H E G, McNicholas K. Gas path cognition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine [R]. AIAA-1997-2904, 1997.
- [3] Powrie H E G, Fisher C E. Engine health monitoring: towards total prognostics [C] // IEEE Aerospace Conference Proceedings, Chandlers Ford, UK, IEEE, 1999: 11-20.
- [4] Fisher C E. Gas path debris monitoring: a 21st century PHM tool [C] // IEEE Aerospace Conference Proceedings, Chandlers Ford, UK, IEEE, 2000: 441-448.
- [5] Fisher C E, Ford C. Data and information fusion for gas path debris monitoring [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, IEEE, 2001: 3017-3022.

- [6] Powrie H E G. Electrostatic charge generation associated with machinery component generation[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA; IEEE, 2002: 2927-2934.
- [7] Novis A, Powrie H E G. PHM sensor implementation in the real world; a status report[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings. Montana, USA; IEEE, 2006: 1-9.
- [8] Powrie H E G, Novis A. Gas path debris monitoring for F-35 joint strike fighter propulsion system PHM[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings. Montana, USA; IEEE, 2006.
- [9] Lapini G L, Zippo M, Trionc G. The use of electrostatic charge measurements as an early warning of distress in heavy-duty gas turbines[C]//ASME Turbo Expo Proceedings. New Orleans, USA; ASME, 2001.
- [10] Wilcox M, Ransom D. Engine distress detection in gas turbines with electrostatic sensors[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air. Glasgow, UK; ASME, 2010.
- [11] 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)
- [12] 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[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 604-608.
LI Yaohua, ZUO Hongfu, WEN Zhenhua. Simulated experiment of aircraft engine gas path debris monitoring technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 604-608. (in Chinese)
- [13] 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[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2174-2181.
LI Yaohua, ZUO Hongfu, LIU Pengpeng. Gas path electrostatic monitoring of turbo-shaft engine; an exploratory experiment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2174-2181. (in Chinese)
- [14] 孙见忠, 左洪福, 詹志娟, 等. 涡轴发动机尾气静电信号影响因素分析[J]. 航空学报, 2012, 33(3): 412-420.
SUN Jianzhong, ZUO Hongfu, ZHAN Zhijuan, et al. Analysis of the influencing factors on the exhaust gas electrostatic monitoring signal of a turbo-shaft engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 412-420. (in Chinese)
- [15] Sorokin A, Arnold F. Electrically charged small soot particles in the exhaust of an aircraft gas turbine engine combustor: comparison of model and experiment[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(17): 2611-2618.
- [16] Haverkamp H, Wilhelm S, Sorokin A, et al. Positive and negative ion measurements in jet aircraft engine exhaust: concentration, size and implications for aerosol formation[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(18): 2879-2884.