

文章编号:1000-8055(2013)03-0531-10

航空发动机尾气静电信号基线模型分析及应用

孙见忠¹, 左洪福¹, 刘鹏鹏¹, 余有锋¹, 陈志雄^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016;

2. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

摘 要: 开展了基于尾气静电信号的航空发动机气路监控技术的应用研究, 把尾气静电监测信号 EGEMS 作为一种新的气路状态参数并建立其基线模型, 通过监控尾气静电信号 RMS (root mean square) 值的偏差值实现对气路部件的实时监控. 首先从尾气静电监测的角度总结了尾气碳烟颗粒物的排放特性, 分析了尾气静电信号的基线成分、主要影响因素及典型故障静电信号特征, 在此基础上分别提出了基于燃油流量单参数的尾气静电信号基线模型(参数化模型)和基于多元状态估计技术的多参数基线模型(非参数化模型)挖掘技术. 通过对某型涡轴发动机尾气静电信号的分析表明: 所建立的基线模型能够准确反映发动机不同工况下的尾气静电信号的基本特征, 有效地监测到气路的异常状态, 验证了所提方法的可行性和有效性.

关 键 词: 气路状态监控; 尾气静电监测; 基线模型; 多源状态估计技术; 发动机健康管理

中图分类号: V231.25

文献标志码: A

Analysis and application of baseline model of aero-engine exhaust gas electrostatic monitoring signals

SUN Jian-zhong¹, ZUO Hong-fu¹, LIU Peng-peng¹,YU You-feng¹, CHEN Zhi-xiong^{1,2}

(1. College of Civil Aviation,

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

2. School of Aeronautic Manufacturing Engineering,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: A study on the application of the aero-engine exhaust gas electrostatic monitoring technology for gas path component condition monitoring was conducted. The exhaust gas electrostatic monitoring signal (EGEMS) was taken as a new gas path parameter and its deviation from the baseline in EGEMS root mean square (RMS) value was monitored for real-time gas path component anomaly detection. Firstly, the exhaust gas soot emission characteristics were studied from the electrostatic monitoring point of view, and then the baseline composition of the EGEMS, the main influencing factors as well as the EGEMS features of the typical faults were studied. Furthermore, two baseline model mining methods were proposed respectively for a single parameter (fuel flow rate) based baseline model (parametric

收稿日期: 2012-03-25

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.531_009.html

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

作者简介: 孙见忠(1982—), 男, 山东胶南人, 博士生, 主要从事航空发动机状态监控与健康管理方面研究.

E-mail: sunjianzhong@nuaa.edu.cn

作者简介: 左洪福(1959—), 男, 湖南株洲人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事可靠性工程、维修理论、故障诊断与监控等方面研究. E-mail: rms@nuaa.edu.cn

model) and a multi-parameter based baseline model (nonparametric model) which was obtained using multi-state estimation technique. The case study on a real EGEMS data set from a turbo-shaft engine shows that the established baseline model can characterize the EGEMS under various operating conditions of the test engine, and can effectively detect the anomaly of the gas path components.

Key words: gas path condition monitoring; exhaust gas electrostatic monitoring; baseline model; multi-state estimation technique; engine health management

现有的气路部件状态监控技术(如气路分析, 转子振动监测等)对航空发动机安全、经济运行具有重要作用^[1], 但时有发生的安全事故也折射出现有监控技术的不足, 除进一步挖掘现有监控技术的潜力外, 开发新的气路监测技术以进一步提高监测范围和深度是一条重要途径. 航空发动机气路静电监测技术正是这样一种新型的监测技术, 能够监测到传统监控方法难以监测到的气路部件故障, 并提供典型气路部件故障的早期预警信息, 为发动机健康状态评估与预测提供新的信息源, 是对传统的气路状态监控技术的一种重要补充.

气路静电监测主要是基于静电感应的原理对气路带电颗粒物进行监测, 实现对气路部件状态的实时监控. 由于气路静电监测是监测气路部件故障的直接产物, 因此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典型故障, 特别是燃烧系统故障、叶片-机匣碰摩、烧蚀掉块类等故障的在线监测以及诊断. 航空发动机气路静电监测技术已应用在美国联合式战斗机 F-35 上, 增强了发动机的故障预测与健康管理能力, 国外公开发表的文献中对于该技术的细节没有透露^[2-6]. 南京航空航天大学航空安全与保障技术研究所从 2007 年就开展了气路静电监测技术研究, 主要侧重于监测原理和模拟实验研究, 文振华等人^[7-8]对气路静电监测技术原理开展了研究, 试制了气路静电监测传感器, 并在模拟实验台上进行了传感器可行性验证, 李耀华等人^[9-11]初步进行了发动机试车台架实验, 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, 验证了气路静电监测系统的可行性, 并开展了叶片-机匣碰摩故障静电监测的模拟实验.

利用设备状态参数的基线模型判断设备运行状态是一种简单且有效的状态监控方法. 参数基线模型反映了设备正常状态下各状态参数之间一种内在的函数关系, 判断设备异常状态的基本依

据是实测状态参数是否偏离基线值, 如在发动机气路分析里通过监控关键性能参数与基线值的偏差值可实现对气路部件的状态监控. 本文把发动机尾气静电监测信号(exhaust gas electrostatic monitoring signal, EGEMS)的 RMS(root mean square)值作为一种新的气路状态参数, 并建立其基线模型用于气路状态的实时监控. 文中尾气静电信号基线模型定义为健康发动机尾气静电信号的 RMS 值与发动机工况参数(如燃油流量)的函数关系. 本文将首先分析尾气静电信号的基线成分及其主要的影响因素, 在此基础上讨论尾气静电信号基线模型的挖掘方法, 为机载静电监测系统的实施提供方法.

1 尾气静电信号基线成分及影响因素分析

健康的发动机处于稳定工作状态时, 尾气中的颗粒物主要为燃油正常燃烧产生的碳烟颗粒, 这些碳烟颗粒在高温环境中高速碰撞荷电后随尾气排出, 在静电传感器上感应出电压信号, 便构成了尾气静电信号的基线成分. 研究尾气碳烟颗粒的排放特性及随发动机工况的变化规律, 对建立尾气静电信号的基线模型具有借鉴意义.

1.1 碳烟颗粒的生成及影响因素

碳烟颗粒主要在燃烧室内高温的局部富油区内生成, 这个区域内雾化的燃油和局部已蒸发的燃油蒸气形成“小口袋”, 富油缺氧, 油滴或燃油蒸气发生不完全燃烧或热裂解后产生出来的一种无定形碳^[12].

影响碳烟颗粒生成的因素非常复杂, 通过对实验数据的分析, 得到一些发动机燃烧室碳烟颗粒的生成随燃烧室工作及设计参数变化的规律^[12-13]. 燃烧室碳烟颗粒的生成与燃油性质、压力、主燃区油气比以及主燃区油气混合有很大关系; 燃料中的氢含量对尾气中碳烟颗粒影响很大,

氢含量越低越容易冒烟,这与燃烧效率的下降有关;燃烧室压力是影响碳烟颗粒生成的一个最重要的参数,压力增大会导致平均油珠直径增大以及局部富油区域的富油程度,最终导致碳烟颗粒生成量显著上升;燃烧室进口温度降低(同样油气比下,出口平均温度亦降低),会导致碳烟颗粒粒子数上升;在其他条件相同的情形下,平均油气比增大,导致主燃区局部富油区域更加富油,也会使碳烟颗粒粒子数增大。

影响碳烟颗粒生成的另外一个重要因素是油珠尺寸。燃油经喷嘴雾化后得到尺寸较小的油珠(平均直径在 $50\sim 55\mu\text{m}$ 以下),在燃烧室中这些油珠又以两种方式燃烧:一种是先蒸发成燃油蒸气,与空气混合后形成预混气态燃烧;另一种情况是,较大尺寸的油珠没有足够时间完全蒸发,火焰附着在油珠周围,以油珠扩散方式燃烧。后一种燃烧方式是燃烧室碳烟颗粒生成的一个重要方式。因此,燃油雾化系统一旦出现问题,如喷嘴积炭,会影响燃油雾化质量,进而引起碳烟颗粒粒子数上升。

1.2 尾气碳烟颗粒排放特性

为研究发动机尾气颗粒物的物理和化学特性以及发动机运行条件、燃油成分等对尾气颗粒物排放的影响,以更好地评估尾气颗粒物排放对环境、气候以及公共健康的影响,美国自2000年以来陆续开展了一系列发动机尾气颗粒物排放特性的实验研究^[14-16]。通过这些实验获得了大量的有关尾气颗粒物排放特性相关数据,分析了燃油成分、发动机工况及外界大气条件对尾气颗粒物排放的影响,得出一些重要结论,为尾气静电信号影响因素的分析及基线模型的挖掘提供了借鉴:

1) 尾气碳烟颗粒质量排放指数及数量排放指数(质量排放指数为每千克燃油产生的碳烟颗粒的质量,单位为 mg ,碳烟颗粒数量排放指数为每千克燃油产生的碳烟颗粒的数量)总体上随着发动机功率的上升呈现出一种“U”型变化趋势:在较低功率下(如地面慢车状态, $4\%\sim 7\%$ 功率)排放指数较高,之后随着功率上升排放指数逐渐降低,在进近状态达到最低(约 30% 功率),之后随着功率增大碳烟颗粒排放指数迅速上升,在最大功率时达到峰值^[14]。

2) 外界大气条件会影响尾气碳烟颗粒排放,特别是温度的变化对碳烟颗粒排放指数的影响非常明显。随着外界温度的升高,同样功率下的碳烟颗粒排放指数会下降,这是由于外界大气温度首

先会影响燃烧室进口温度,进而影响燃烧效率。此外,外界大气温度还会影响名义功率下的实际供油量,即同等功率下,随着外界大气温度上升,实际燃油供油量会下降,而燃油流量会影响燃油雾化及燃油/空气比率,进而影响燃烧室中碳烟颗粒的生成。因此,文献^[14]指出,相对于发动机的功率或推力,燃油流量是一个更加合适的解释碳烟颗粒排放指数变化趋势的独立变量。

3) 发动机使用 and 维修因素会影响尾气碳烟颗粒排放特性^[14]。

因此,对于一台给定的发动机,在地面状态下,燃油流量与尾气碳烟颗粒排放指数具有较强的相关性,而健康发动机尾气中静电荷水平主要取决于碳烟颗粒的数量,因此在建立尾气静电监测信号的基线模型时,燃油流量是一个相对比较合适的自变量参数;另一方面,现代发动机数据记录仪通常记录了燃油流量这一参数,因此从实际工程应用的角度来看,选择燃油流量作为自变量易于实现。但实际上除燃油流量外,外界大气条件等工况参数对发动机碳烟颗粒排放也具有重要影响,特别是燃烧室进口温度、压力等参数直接影响碳烟颗粒的生成速率,因此仅以燃油流量为自变量来建立尾气静电信号的基线模型未必适应于高空飞行状态下发动机的复杂工况,需要考虑建立基于多状态参数的基线模型。

2 故障颗粒物的生成及对静电信号的影响

燃烧系统出现故障影响正常组织燃烧将导致生成过量的碳烟颗粒,而其他气路部件故障,如热端部件的烧蚀和掉块、叶片-机匣碰摩等也会产生故障颗粒,导致尾气总体静电荷水平变化,进而引起静电信号异常,且不同的故障引起的静电信号的变化规律不同,这就为基于尾气静电信号的气路部件故障监测以及诊断提供了可能。

2.1 燃烧类故障

典型的燃烧类故障有喷嘴积炭、燃烧室气流结构异常等。

2.1.1 喷嘴积炭

积炭是各种油类物质燃烧或炭化后与一部分聚合物分子混杂而形成的坚硬的沉积层。喷嘴端面的严重积炭会造成喷口局部堵塞,阻挡雾锥形成,导致喷油不均,进而导致燃油质量分数以及燃烧室出口燃气温度分布的不稳定,严重时引起火

焰筒和导向器叶片的烧伤^[17]。喷嘴积炭容易产生较大的燃油液滴,以液滴扩散方式燃烧而产生过量碳烟颗粒;另一方面喷嘴积炭引起燃油分布不均,易导致部分区域过富油,也会产生过量的碳烟颗粒^[12]。

2.1.2 燃烧室气流结构异常

燃烧室内气流结构偏离设计要求,会导致燃烧组织不当、燃烧效率降低,严重时引起燃烧室出口燃气温度的变化,最终导致导向器或涡轮叶片局部超温而烧伤。造成燃烧室内气流结构异常的因素非常复杂,如燃烧室火焰筒内壁、稳定器、燃油喷嘴防积炭帽罩表面积炭,会引起燃烧室内的空气量分配以及燃烧区和掺混区射流穿透深度的变化,导致气流结构偏离设计要求。此外,喷嘴松动导致喷孔与旋流器不同心引起喷雾锥角各部位油量分配不均匀,火焰筒局部过热、掉块、裂纹致使局部火焰筒变形,掺混孔位置变化,气膜孔流量差异等,均会导致气流结构、燃油质量分数偏离设计要求,从而极易产生局部区域富油,导致过量的碳烟颗粒生成^[12,18]。

2.2 机械类故障

典型的气路部件故障,如叶片-机匣碰摩、烧蚀掉块、涂层剥落、外来物吸入等,会产生较大的故障颗粒物。

2.2.1 叶片-机匣碰摩

叶片-机匣碰摩是一类典型的航空发动机转子故障,碰摩发生时叶尖以极快的速度划过机匣内壁,在短时间内造成局部区域温度快速升高,密封材料磨损而产生大量的磨屑。相对于燃烧产生的碳烟颗粒,碰摩产生的颗粒物的尺寸通常较大。磨粒在产生时就已带有静电荷,同时与高速气流、其他磨粒及气路部件碰撞摩擦作用下会得到或失去电荷,经过燃烧室及涡轮的高温段会进一步吸附电荷,这些带电颗粒物会造成气路整体电荷水平的变化。由于碰摩的发生通常具有周期性且与转子的工作频率有关,轴频分析是确认碰摩故障、并进一步隔离碰摩故障到单元体部件的重要方法^[4,10]。

2.2.2 气路部件损伤

压气机叶片常见的损伤现象有:掉块、断裂和腐蚀等,特别是压气机1级叶片受外来物冲击而导致叶片掉块和断裂的故障较多。故障颗粒物会通过气路随尾气排出发动机,这个过程中与高速气流、气路部件剧烈摩擦而携带静电荷,且由于故

障颗粒尺寸较大而带电较多,经过静电传感器时会瞬间引起尾气静电信号的剧烈变化。同样的,燃烧室部件的腐蚀、掉块等也会产生故障颗粒物,引起尾气静电信号的异常。外场使用中涡轮叶片经常发生烧蚀、烧伤掉块、热腐蚀等现象,叶片受高温、高压气流冲击还会产生涂层烧蚀剥落^[18]。热端部件的烧蚀、烧蚀掉块以及涂层剥落等均会产生故障颗粒物,同样与高速气流、其他颗粒物及气路部件剧烈摩擦而携带电荷,引起尾气静电水平水平的变化。

3 尾气静电信号基线模型挖掘

燃烧类故障如喷嘴积炭,通常对燃烧的影响是连续性的,因此造成尾气静电信号的变化也将是持续性的或在一定的工况下重复出现;而外来物吸入、气路部件损伤掉块等,一般具有偶发性和突发性,通常会引起静电监测信号特征参数的突然变化,同时由于这一类故障产生的颗粒物尺寸较大、携带电荷量较多,随尾气排出时会瞬间引起静电信号幅值的剧烈变化;而对于热端部件的烧蚀故障则通常在某些特定工况下,特别是大功率状态下更易造成叶片烧蚀而产生大量的故障颗粒物^[6]。这些典型的气路部件故障发生时,虽然其静电信号的变化特征各有不同,但均会导致气路整体静电水平发生变化,进而引起尾气静电监测信号偏离基线。

3.1 发动机尾气静电监测实验介绍

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(1级离心式和1级轴流式)、燃烧室和2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。为改善发动机性能,提高发动机效率,在101次和151次试车后对发动机进行了水洗,其中第2次水洗效果比较明显,而第1次水洗对发动机性能的改善并不明显。

发动机尾气通过2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1h,称为一个试车阶段。在每个试车阶段按试车程序推动油门杆,在达到规定的输出轴功率后稳定一段时间并采集状态参数,然后发动机将被切换到下一个稳定状态,一直到整个试车程序结束,每个试车记录包括各稳定状态的状态参数(表1所示)。静电传感器在每个试车阶段开始

前开始采集信号,停车后停止.此次发动机台架试车实验中,总共采集了从第 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,实际得到了 107 个试车阶段的有效数据^[9].

表 1 试车主要测量参数
Table 1 Measured parameters during engine test

参数名称	符号	单位
外界温度	t_0	$^{\circ}\text{C}$
外界压力	p_0	Pa
燃气发生器转速	N_1	r/min
输出轴转速	N_{sd}	r/min
燃气涡轮前温度	t_3	$^{\circ}\text{C}$
燃气涡轮后温度	t_4	$^{\circ}\text{C}$
输出轴扭矩	M	$\text{N} \cdot \text{m}$
输出轴功率	P	kW
燃油流量	W_f	kg/h
压气机出口压力	p_2	MPa
增压比	Π	
空气流量	W_a	kg/s

3.2 基于燃油流量的参数化基线模型

3.2.1 基线模型挖掘

文献[11]通过分析一个试车阶段内实测的各稳定状态下的静电信号及燃油流量,拟合出静电信号 RMS 值随燃油流量的变化趋势,见图 1.

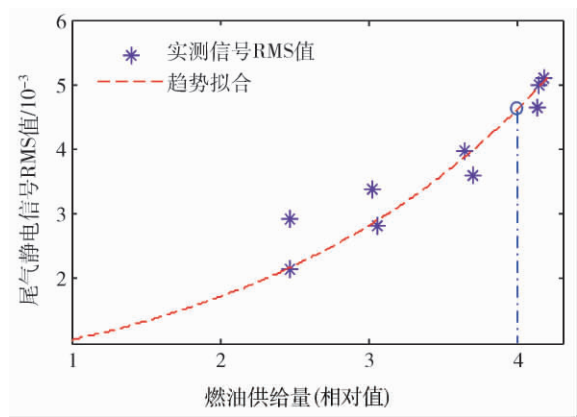


图 1 尾气静电信号 RMS 值随燃油供给量的变化趋势
Fig. 1 Trend of the EGEMS RMS value against the fuel rate

由于尾气碳烟颗粒排放自身的波动性及测量

噪声等原因,仅借助一次试车数据建立起的静电信号的“基线”难以合理反映发动机尾气静电信号特征,因此需要更多的数据建立起统计意义上的基线模型.图 2 所示为依据“健康”发动机在地面试车台上的 20 次试车数据(第 121 至 140 次试车)建立起的基线模型,在这一阶段内发动机没有明显的故障,也没有进行水洗,因此,其代表了发动机的尾气静电信号的基本特征.

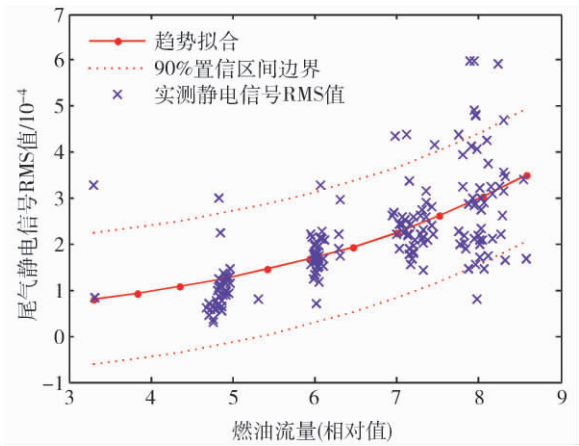


图 2 基于燃油流量参数的尾气静电信号基线
Fig. 2 Baseline of the EGEMS against the fuel rate

图 2 纵向比较可得,即使同样燃油流量条件下尾气静电信号的 RMS 值相差较大,除了尾气碳烟颗粒排放的波动性以及传感器噪声外,本次实验中信号处理引进的误差是造成 RMS 值离散度较大的一个重要原因.本次台架试验中虽然持续的采集了尾气静电信号,但却没有持续的采集状态参数(如燃油流量),而只是记录了发动机各稳定状态下的一个状态参数样本来表征此稳定状态,这就给严格按时间来同步燃油流量信号与尾气静电信号带来了困难.因此,在信号处理时我们把各“稳定状态”下的一段时间内的静电信号的 RMS 值的均值和此“稳定状态”下采集的燃油流量参数相匹配,这显然会引进一定的信号处理误差.实际的发动机数据记录系统一般能持续的记录主要的状态参数,因此实际中不存在这一类由于信号处理而引进的误差.尽管如此,实测的静电信号 RMS 值总体上仍呈上升趋势,可以根据这些实测数据建立其尾气静电信号的基线,且无故障状态下多数实测数据点落在 90% 置信区间内,见图 2.

图 2 横向看,静电信号 RMS 值的主要集中

在4个区域,代表4个稳定功率状态(420, 630, 840, 1000kW),由图示结果可见相同输出功率下,其实际的燃油流量并不相同,这主要是由于外界大气条件的变化引起的。通常在地面状态下,为输出同样的功率,外界大气温度越低,需要消耗更多的燃油。

图3所示为106/107和142/143次试车的数据,其中第106/107次试车时外界大气温度和压力为21℃和101100Pa左右,而第142/143次试车时外界大气温度和压力为6℃和102350Pa左右,显然低温条件下消耗燃油更多。因此,相对于功率或推力等参数,在建立单参数的尾气静电信号基线时,燃油流量参数是一个更加合适的参考变量。

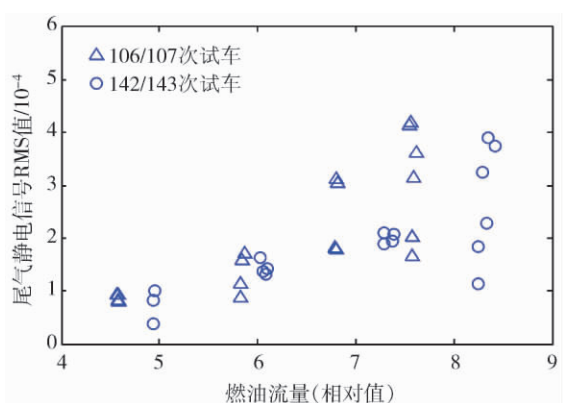


图3 相同输出功率条件下燃油流量的变化

Fig. 3 Variance of the fuel flow rate for the same output power

3.2.2 气路异常状态监测及原因分析

正常情况下静电信号的RMS值应在以图2所示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有着显著的变化,这通常是由于气路部件突发性故障或外来物吸入造成的。

得到基线模型后(图2),即可用于气路部件的在线监测,如图4所示,图中“△”所示为第2次水洗(第151次试车后)之后的5个试车阶段内的各稳定状态下的尾气静电信号RMS值;“+”为最后20次试车(第181次至第200次)各稳定状态下的尾气静电信号RMS值。图示结果显示,水洗后以及后20次试车的尾气静电信号表现出明显的异常,静电信号RMS值严重偏离基线,且随着燃油流量的增大,偏差值越来越大(图5所示)。

传感器故障、水洗及气路部件故障等因素均

可造成尾气静电信号的异常。试车试验后对传感器的检测并没有发现明显的传感器故障。此外,传感器故障对监测信号的影响通常不会随着发动机工况的变化而变化,但图5所示结果显示静电信号RMS偏差值与发动机工况具有一定的相关性。因此,综合分析基本可排除传感器故障这一因素。航空发动机水洗是指在不拆卸发动机的条件下,利用特定的清洗液对发动机气路进行清洗,以除去沉积在叶片和内壁上的灰尘和沉积物,进而改善发动机性能。图4所示,在水洗之后的几个试车阶段内发动机的尾气静电信号出现了异常,这是一种正常现象,而不是气路故障引起的^[4,9]。这种现象的出现是由于水洗时冲刷下的污染物(灰尘、沙石、盐分、叶片涂层材料等)沉积在气路内,当发动机再次工作时,这些沉积物随气流排出,而导致气路静电信号的异常;另一种可能原因是水

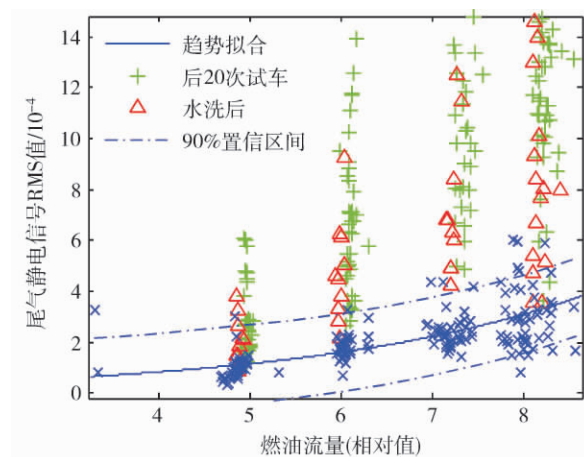


图4 基于尾气静电信号基线的异常状态监测

Fig. 4 Anomaly detection based on the baseline model of the EGEMS

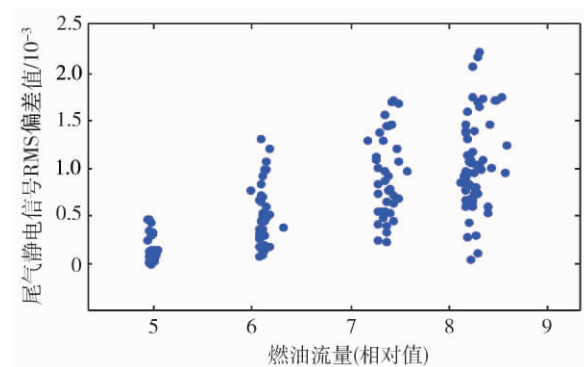


图5 尾气静电信号RMS偏差值(后20次试车)

Fig. 5 Deviation of the RMS value of EGEMS (last 20 engine tests)

洗造成了发动机内部某些间隙配合改变,重新运行时相互磨合产生颗粒物。

发动机尾气静电信号在约第170次试车后表现出异常,其RMS值逐渐偏离基线(图4给出了后20次试车的数据),且RMS偏差值越来越大(图5所示)。考虑到该发动机已经历过2000h试车以及两次大修的情况,这一异常变化很可能与某种气路部件故障有关。外来物吸入、掉块以及碰摩等突发性故障一般会造成静电信号瞬时或短时间内偏离“基线”,而图4所示结果显示,后20次试车中在各种工况下尾气静电信号持续性的表现出异常,因此基本可排除这一类机械故障。试车实验结束后的发动机拆解检查报告也验证了这一推断,气路部件没有明显的碰摩以及掉块故障发生。而燃烧类故障通常会引起静电信号持续偏离基线,因此后20次试车中尾气静电信号的异常很可能与燃烧系统故障有关。孔探检查及试车后的发动机拆解检查报告显示,燃烧室火焰筒壁靠近前段位置出现了明显的裂纹,且此裂纹扩展已比较严重。发动机在工作状态下,气流通过裂缝进入火焰筒,一方面可能会影响燃油雾化,降低雾化质量;另一方面,气流的提前掺混也可能破坏正常的气流结构,影响火焰筒内空气流量分配,从而极易可能产生局部区域富油而导致过量的碳烟颗粒的生成^[12,18]。随着发动机功率的上升,燃烧室进气压力进一步升高,裂缝也可能随着温度升高而进一步扩大,使得更多的气流通过裂缝提前进入火焰筒,导致燃烧组织进一步恶化而产生更多的碳烟颗粒,表现在尾气静电信号上就是随着燃油流量的增加,其RMS偏差值也进一步增大(见图5)。

造成这一现象的另一种可能的原因是热端部件的烧蚀故障,文献[6]的研究显示:随着发动机供油量的增加,涡轮进口处温度进一步升高会导致叶片烧蚀现象加重,引起尾气中故障颗粒物粒子数的上升。火焰筒裂纹导致气流的提前掺混会影响燃油雾化质量并破坏正常的气流结构,易使燃烧室出口温度分布不均并出现局部超温现象。当导向器以及涡轮叶片温度超标时,其涂层表面受高温、高压气流冲击将会产生烧蚀剥落^[18],产生故障颗粒物,进而引起尾气静电信号的异常。随着燃油流量的增加,燃烧室出口温度进一步升高,烧蚀现象加剧,而导致尾气中故障颗粒物粒子数进一步升高,尾气静电信号的RMS偏差值也随之上升。

由图4和图5所示结果可见,气路部件异常

引起的静电信号RMS值的偏差远远大于尾气静电信号基线自身的离散度,两者相差接近一个数量级,说明尾气静电传感器对气路部件故障具有较高的灵敏度,即使较小的气路部件故障,特别是燃烧系统的故障都有可能引起尾气静电信号显著偏离基线。

3.3 基于多参数的非参数化基线模型

借助燃油流量单个参数来建立基线模型,方法简单且工程上易于实现,但实际上除燃油流量外,外界大气条件等工况参数对发动机碳烟颗粒排放具有重要影响,因此仅以燃油流量为自变量来建立静电信号的基线模型,未必适合于高空飞行状态等复杂工况条件。气路静电监测要求能够对发动机进行持续的在线监测,因此需要建立能够适应发动机各种复杂工况的基线模型,而仅靠燃油流量单个参数难以描述发动机的复杂工况。本节考虑结合其他状态和工况参数建立基于多参数的尾气静电信号基线模型,以期能准确地描述发动机在各种复杂工况下的尾气静电信号的基本特征,为机载静电监测系统的实现提供方法。

3.3.1 非参数化建模技术

尾气静电信号的影响因素非常复杂,与其他变量(如压力,温度等)之间存在何种物理或函数关系也不明确,因此要建立基于多变量的参数化基线模型非常困难。而非参数化模型不需要对基线模型做任何假设,多变量之间的关系不需借助某个特定的函数来描述,而是通过一组特定的历史数据样本来描述。多元状态估计技术(MSET)就是这样一种非参数化建模技术,通过收集足够多的、足以涵盖系统正常运行状态的历史数据,并从中学习各个状态参数之间的相互关系^[19],当一个新观测样本到达时,MSET借助已学习到的模式(这个模式实际包含在收集的历史数据中)来估计系统当前时刻的状态。相对于参数化的建模技术,MSET模型构建过程更加快速和简单,易于扩展以包含新的工作状态而不需要重新学习或训练,同时估计系统状态时计算量小,因而可更好地满足状态监控的实时性要求。

假设系统工作状态由 P 个状态量描述,则在 τ_j 时刻,系统的观测向量为

$$X(\tau_j) = [x_1(\tau_j), x_2(\tau_j), \dots, x_P(\tau_j)]^T$$

则系统模型可以由正常状态下采集的 M 个观测向量构成的矩阵来描述,这个矩阵称为训练矩阵。

$$D = \begin{bmatrix} x_1(\tau_1) & x_1(\tau_2) & \cdots & x_1(\tau_M) \\ x_2(\tau_1) & x_2(\tau_2) & \cdots & x_2(\tau_M) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_P(\tau_1) & x_P(\tau_2) & \cdots & x_P(\tau_M) \end{bmatrix}$$

训练矩阵 D 的每一列代表系统运行状态的一个观测向量,可包括任意数目的观测向量,但应尽量涵盖系统所有正常运行状态或感兴趣的运行状态.一旦创建了训练矩阵,MSET 就可根据新的观测向量来对系统的动态行为进行估计.假设系统在某时刻的新观测向量为 X_{obs} ,MSET 将当前观测向量与训练矩阵的每一个历史观测向量进行相似性比较,并计算出对当前系统状态的估计

$$X_{\text{est}} = D \cdot W \quad (1)$$

式中 W 为权重向量,代表当前观测向量和历史观测向量之间的一种相似性测度. W 由下式得到:

$$W = (D^T \otimes D)^{-1} \cdot (D^T \otimes X_{\text{obs}}) \quad (2)$$

式中 $\otimes$ 是一种非线性运算,旨在将输入向量空间转换到特征空间,该空间是由输入数据与训练数据的相似度构成的,称为相似特征空间.非线性运算符是 MSET 的一个关键技术,又称为相似性运算符,它使得的矩阵 $D^T \otimes D$ 成为可逆的.针对不同的应用问题,MSET 会选择或设计不同的相似性运算符来构造相似特征空间^[19].核函数是常用一种的相似性运算符,而其中高斯核函数应用最广泛,本文采用高斯核函数来实现相似性运算,计算方法如式(3)

$$K_h(x, x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h} e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2h^2}} \quad (3)$$

其中 h 是核函数带宽, $K_h(x, x_i)$ 即表示向量 x 与 x_i 之间的相似度.

为降低训练矩阵病态对估计结果的影响、提高 MEST 算法性能,实际计算中常采用岭正则化技术将式(2)中的 $D^T \otimes D$ 项由下式代替^[20]:

$$D^T \otimes D + \lambda I$$

其中 $\lambda (\lambda > 0)$ 为正则化参数, I 为单位矩阵.一般 λ 的选择也是个优化问题,文献^[20]的研究表明:当训练样本标准化后(均值为 0,标准差为 1),核函数带宽为 1 时,正则化参数 λ 取值为 1 通常能取得较好的效果.

3.3.2 MSET 用于基线模型挖掘

此次发动机台架试验中测量的主要的气路参数如表 1 所示,考虑到实际的机载系统的可测参数以及各状态参数与尾气静电信号的相关性,在本文中选取 8 个状态参数和尾气静电信号 RMS

值(E_{rms})构成系统的观测向量

$$X =$$

$$[t_0, p_0, N_1, N_{\text{sd}}, t_4, W_f, p_2, \Pi, W_a, E_{\text{rms}}]^T \quad (4)$$

持续的在线监测要求尾气静电信号基线模型能适应于发动机各种复杂工况,一方面要求监测系统能够满足实时性,另一方面又要求训练矩阵包含尽量多的观测样本以涵盖系统正常运行的各种状态,但过多的训练样本会对监测系统的实时性要求带来挑战.如何合理地选择合适的训练样本是 MEST 技术的一个重要问题,本文采用最小-最大法与样本向量排序法的混合方法来选择训练样本,以涵盖系统的所有正常状态,同时尽量减少训练样本数量^[21].由于目前只有地面台架试车数据,这里仍然借助地面试车数据来说明这种方法,但这一方法可推广应用来构建真正的全工况下的尾气静电信号基线模型.同样选择第 121 至 140 次试车的数据来构建基线模型,其中每次台架试验中获得了 9 个观测样本,共获得 180 个观测样本,按照混合法来筛选观测样本,最终得到 71 训练样本构成训练矩阵

$$D = \begin{bmatrix} t_0^1 & t_0^2 & \cdots & t_0^{71} \\ p_0^1 & p_0^2 & \cdots & p_0^{71} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_a^1 & W_a^2 & \cdots & W_a^{71} \\ E_{\text{rms}}^1 & E_{\text{rms}}^2 & \cdots & E_{\text{rms}}^{71} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在得到系统的训练矩阵后,就可根据式(1)来对系统的动态行为进行估计.本研究中采用高斯核函数作为相似性运算符来计算 2 个向量之间的相似度,带宽取 $h = 1$;同时采用正则化技术,取正则化参数 $\lambda = 1$.取第 141 次至第 150 次试车的数据(共 90 个观测样本)作为测试集来验证基于 MSET 的尾气静电信号基线模型,图 6 所示为实测的健康发动机的尾气静电信号 RMS 值与基线值的对比图,图中结果显示,多参数基线模型基本能够反映健康发动机各种工况下尾气静电信号的特征,其基线值与实际测得尾气静电信号 RMS 值比较接近.图 7 为实测的静电信号 RMS 值与基线值的偏差值,更加清楚地表明健康发动的静电信号 RMS 值比较接近基线值,其偏差值在 0 上下振荡.

3.3.3 气路状态实时监控

建立起尾气静电信号基线模型后,通过监控实测尾气静电信号 RMS 值与基线值的偏差值即可实现对气路部件异常状态的实时监控.图 8 所

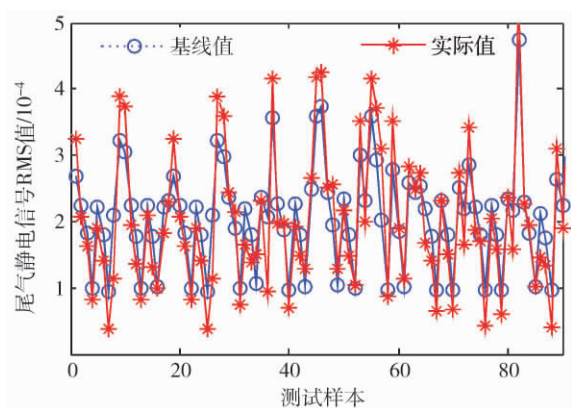


图6 尾气静电信号 RMS 值与基线值对比图

Fig. 6 Comparison of the baseline and the RMS value of EGEMS

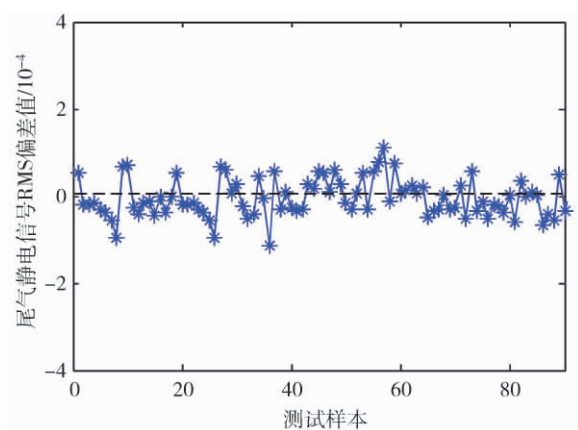


图7 尾气静电信号 RMS 值与基线值的偏差

Fig. 7 Deviation of the baseline and the RMS value of EGEMS

示为 141 次至第 200 次试车的尾气静电信号 RMS 偏差值序列(每次试车采集了 9 个观测样本,共 540 个观测样本),图示结果显示水洗后的几次试车及后 20 次试车尾气静电信号出现明显的异常,与第 3.2 节的分析结果一致,证明了基于 MSET 技术的多参数基线模型的有效性。

在 CPU 主频为 2.99 GHz、内存为 3 GB 的计算机上,利用未经优化的 Matlab 程序完成上述计算(540 个测试样本)共耗时 21.5 s,平均每个测试样本的计算耗时 40 ms,而实验用静电系统监测每 1 s 采集一个观测样本,因此基于 MSET 技术的基线模型在计算速度上能够满足实时性要求。但目前数据有限,只是建立了涵盖地面各工况的基线模型(只考虑了 4 个稳定状态),其工况相对简单,需要的训练样本数量较少(仅 71 个),因此计算速度较快。而在飞行状态下,发动机工况更加复

杂,要建立全工况的基线模型需要更多的训练样本,必然会影响计算速度,因此还需要进一步研究如何合理地选择观测样本以及算法的优化。此外,观测样本中状态参数的选择不仅影响 MSET 算法性能,而且其维数大小会影响计算速度,MSET 技术要求观测样本的各状态参数之间存在一定的相关性,因此如何选择合适状态参数也是需要研究的一个问题,一般可根据专家经验或物理规律来选择相关性较强的状态参数,也可通过各状态参数序列的相关性分析来选择。由于目前所获得的数据非常有限,仅有地面试车台数据且数据处理时引进了较大的误差,因此本文研究中并没有对状态参数的选择进行深入研究,简单地选择了 8 个气路状态参数和尾气静电信号 RMS 值来组成观测样本,但实际上有些状态参数与尾气静电信号之间的相关性较弱,后续研究中有待进一步深入。

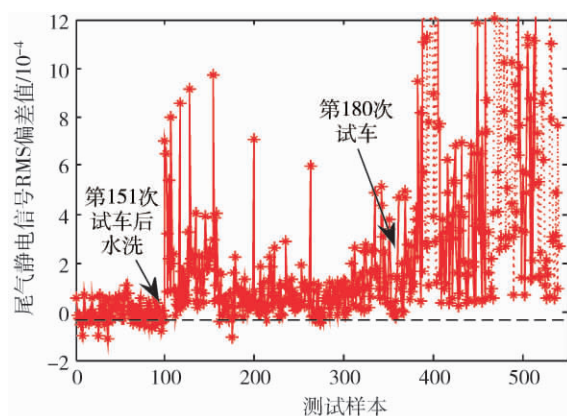


图8 尾气静电信号 RMS 偏差值序列

Fig. 8 Deviation series of the RMS value of EGEMS

4 结 论

本文从静电监测的角度总结了发动机尾气碳烟颗粒的排放特性,分析了尾气静电信号的基线成分及其主要影响因素,在此基础上建立了尾气静电信号的基线模型以用于气路部件状态的实时监控,最后通过实测的涡轴发动机数据验证了本文所提出的方法的可行性和有效性。

在地面状态下,尾气静电信号 RMS 值随燃油流量增加呈近似指数增长的趋势,因此以燃油流量参数为参考变量建立了尾气静电信号的基线模型。基于燃油流量的单参数尾气静电信号基线模型简单且工程上易于实现,但实际上发动机其他的工况参数对碳烟颗粒的排放也具有重要影响,特别是在飞行状态下,仅以燃油流量单个变量

难以描述发动机的复杂工况.因此,本文借助多元状态估计技术建立了基于多参数的尾气静电信号基线模型,以更准确地描述发动机在各种复杂工况下的尾气静电信号的基本特征,为机载实时静电监测系统的实现提供方法.借助地面试车台实测数据对这两种基线模型进行了验证,结果表明:所建立的基线模型均能够准确反映发动机不同工况下的尾气静电信号的基本特征,且有效地捕捉到了气路的异常状态.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Honor P,Novis A. Gas path debris monitoring for F-35 Joint Strike Fighter propulsion system PHM[R]. Big Sky, MT:IEEE Aerospace Conference Proceedings,2006.
- [3] Couch R P,Rossback D R,Burgess R W,et al. Sensing incipient engine failure with electrostatic probes[C]//Instrumentation for Airbreathing Propulsion,Proceeding of the Symposium, Seattle WA,USA:AIAA,1972:519-529.
- [4] Powrie H E G,McNicholas K. Gas path condition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine[R]. AIAA-97-2904,1997.
- [5] Fisher C E. Gas turbine condition monitoring systems: an integrated approach[R]. Big Sky, MT IEEE Aerospace Conference Proceedings,2000.
- [6] Fisher C E. Gas path debris monitoring: a 21st century PHM tool[R]. Big Sky, MT IEEE Aerospace Conference Proceedings,2000.
- [7] 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)
- [8] 文振华,左洪福,王华,等. 航空发动机气路静电监测传感器特性[J]. 传感器与微系统,2008,27(11):28-31.
WEN Zhenhua,ZUO Hongfu,WANG Hua,et al. Characters of sensor for aero engine gas path electrostatic monitoring[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2008,27(11):28-31. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 李耀华,左洪福. 碰摩故障静电监测方法及模拟实验[J]. 航空学报,2010,31(6):1156-1163.
LI Yaohua,ZUO Hongfu. Method for rub fault detection based on electrostatic technique: model and simulated experiments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2010,31(6):1156-1163. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京:宇航出版社,1988.
- [13] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. Washington: Hemisphere Pub. Corp.,1983.
- [14] Wey C C,Anderson B E,Hudgins C,et al. Aircraft particle emissions experiment (APEX) [R]. NASA/TM-2006-214382,2006.
- [15] Kinsey J S. Characterization of emissions from commercial aircraft engines during the aircraft particle emissions experiment (APEX) 1 to 3[R]. EPA-600/R-091/130,2009.
- [16] Kinsey J,Dong Y,Williams D C,et al. Physical characterization of the aircraft particle emissions from commercial aircraft engines during the aircraft particle emissions experiment (APEX) 1-3[J]. Atmospheric Environment,2010,44(7):2147-2156.
- [17] 陈锐,周彤,顾铭企. 某型发动机主燃烧室积炭的排除[J]. 航空发动机,1996(3):16-20.
CHEN Rui,ZHOU Tong,GU Mingqi. Remove of the carbon deposit in the combustion chamber of some aeroengine[J]. Aeroengine,1996(3):16-20. (in Chinese)
- [18] 姚四伟,张力先,霍岩. 发动机燃烧室部件故障的分析与预防[J]. 西安航空技术高等专科学校学报,2008,26(1):18-20.
YAO Siwei,ZHANG Lixian,HUO Yan. Analysis and prevention on malfunctions of engine combustion chamber parts[J]. Journal of Xi'an Aerotechnical College,2008,26(1):18-20. (in Chinese)
- [19] Hines J W,Garvey D,Seibert R,et al. Technical review of on-line monitoring techniques for performance assessment: Volume 2 theoretical issues[R]. Washington DC,US: Nuclear Regulatory Commission,NUREG/CR-6895,2007.
- [20] Hines J W,Usynin A. MSET performance optimization through regularization[J]. Nuclear Engineering and Technology,2005,38(2):356-362.
- [21] Hines J W,Garvey D. Traditional and robust vector selection methods for use with similarity based models[R]. Albuquerque,MN:5th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation,Control and Human-Machine Interface Technologies,2006.