

某小型航空涡喷发动机在线 综合监测方法研究*

Research of On-Line Monitoring Method for Small Turbojet Engine

总参谋部第60研究所 夏扬 王海鹏
南京航空航天大学民航学院 刘鹏鹏 左洪福



夏扬

高级工程师,总参谋部第60研究所副总工程师,从事无人机总体设计工作、发动机整机设计、状态监控、故障诊断、发动机性能评估等方面的研究;担任三型无人机用航空活塞发动机项目、二型无人机用微型涡喷发动机项目、亚音速无人机项目负责人;获全军科技进步二等奖3次,其中在两个获奖项目中为第一设计人。

对航空涡喷发动机一般是按推力量级来区分超微型、微型和小型涡

本文介绍了某小型航空涡喷发动机的基本情况,描述了使用的发动机试车台的基本情况,详细介绍了其各个组成部分。在某型航空涡喷发动机研制过程中,开展了对该发动机进行寿命试车的工作,为了准确地获取发动机的运行状态使用了包含振动、滑油温度、气路静电等监测手段的在线综合监测系统来采集发动机的状态数据。

喷发动机^[1]。小型发动机推力量级为1000~20000N,微型发动机的推力量级在1000N以下,超微型发动机的推力量级在10N以下。随着我国无人机技术的持续发展,对于小型航空发动机的需求也越来越高^[2],研制小型高性能低成本涡喷发动机是发展我国高空、高速无人机的关键技术之一。小型涡喷发动机具有尺寸小、转速高等特点,其设计、研制不同于大型涡喷发动机,必须着重解决小型化所带来的性能衰退速度快、部件故障频率较高等一系列问题^[3]。对于设计制造的小型航空涡喷发动机需要进行寿命试车,来综合验证发动

机的整机性能以及各零部件、附件是否满足设计要求,在寿命试车过程中需要准确及时地获取发动机的状态信息,确定发动机状态。为了实现这一目的,在航空试车台采用了振动、滑油温度等常见的监测方法,但是这些方法无法在线监测发动机气路部件的早期故障情况,所以引入了南京航空航天大学研究的气路静电监测系统,建立了各子系统可同步运行的在线综合监测系统。通过组建的在线综合监测系统可以获取航空发动机的多类监测数据,本文利用模糊理论将这些信息进行融合处理,综合利用监测信息来表征发动机健康状况。

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

在小型涡喷发动机试车过程中,一直被一个很重要的工程问题所围绕,即如何实现根据发动机的状态确定对发动机进行分解的时间点。为了解决这一问题,研究了通过模糊信息融合以及历史试车数据的拆解决策模型,并通过实际试车数据进行了验证,取得了较好的效果,能够表征发动机拆解的时间确定问题,可以为发动机拆解时间提供合理的依据。

某小型航空涡喷发动机的研制与寿命试车

我所成功研制了某小型航空涡喷发动机,其主要结构为:带整流罩的亚声速轴向进气机匣、单级离心式压气机、带10个离心式喷嘴的环形燃烧室、单级向心涡轮、简单收敛尾喷管。为了综合验证该航空涡喷发动机,对评定周期内生产且经质量部门验收合格的某小型航空涡喷发动机进行随机取样作为寿命试车用发动机。通过寿命试车验证发动机各项技术指标的准确性,确定各核心部件的低周与高周疲劳寿命、发动机维护性定量指标及寿命周期内发动机性能退化规律。寿命试车过程中,所采用的试车谱如图1所示,每一个试车阶段分为22小阶段左右,其中由于数据比较敏感,故对转速原始数据做了等比例处理,降低了相同的倍数,隐去了真实的转速数据。

使用经化验合格的规定牌号的燃油和4106滑油。在规定的第一次“首翻期100h”期间内,发动机及控制系统不允许再调整,不允许更换零、部件和附件。在规定首翻期结束后,可根据发动机实际运行状态调整控制系统,对发动机进行分解检查(检查方法参照GJB241中持久试车程序),对发动机的部分零部件及附件可以进行更换及维护,以确保发动机工作安全、可靠。当寿命试车完成第200个阶段时,如发动机依然能稳定、可靠地运行,可继续进行寿命试

车,直至第240个阶段结束。

试车台整体系统组成

本次某小型航空涡喷发动机寿命试车所采用的试车台为4000N推力级别涡喷发动机整机试车台。试车台主要有推力台架系统、燃油供应系统、电气控制系统及在线综合监测系统组成^[4],各组成部分的详细情况如下所述。

1 推力台架系统

推力台架系统包括推力测量台架、推力校准子系统、进气装置及油封子系统等。推力测量台架主要包括动架、静架、发动机安装架、弹簧片、保险栓、推力测量和校准系统、工作平台等。动架与静架主体框架均

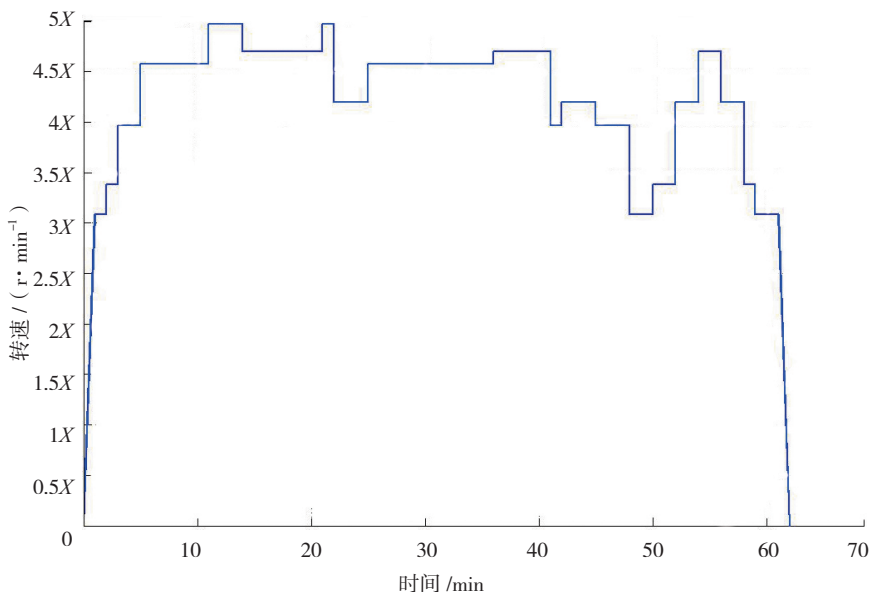


图1 发动机地面台架试验试车谱

采用结构钢材焊接、经时效处理后组合加工,具有较好的强度与刚度,动架与静架之间通过4片弹簧片相连,并设置有保险栓。

2 燃油供应系统

燃油供应系统包括增压泵、燃油调节计量装置、阀门及管路等。通过增压泵及旁路可调节发动机所需供油压力(0~0.1MPa),过滤精度为 $10\mu\text{m}$,最大供油量为 280kg/h 。在发动机燃油泵进口处设置有防火开关,

用于在紧急情况下快速切断燃油的供给。油滤采用粗、中、细3级,燃油系统入口处采用 $50\mu\text{m}$ 滤网,流量计进口处设置 $20\mu\text{m}$ 油滤,在发动机燃油泵进口端配置 $10\mu\text{m}$ 油滤。油滤均带有压差式堵塞报警发讯器。

3 电气控制系统

车台电气控制系统包括交直流系统、应急电源、稳压电源、操纵台、电动油门操纵系统、安全保护装置等。交直流电源系统向发动机试车台中的交流电器和直流电器设备提供相匹配的电源。车台电源由3个模块电源和1个UPS不间断电源组成,3个直流电源模块通过UPS供电,保证在停电情况下实现安全保护。电动油门操作系统采用推杆形式,并

具有微调功能,角度范围为 $0\sim 100^\circ$,分辨率优于 $\pm 0.5^\circ$,可输出 $0\sim 5\text{V}$ 信号至ECU,可实现手动控制,并具有紧急停车功能。电气控制系统设有故障保护功能,所有故障通过PLC程序锁定,如果复位按钮仍未复位,报警指示将一直存在。系统保护停车信号通过PLC发送给ECU停车指令,同时断开燃油泵供电,实现保护功能。

4 在线综合监测系统

(1) 在线综合监测系统的组成。

在线综合监测系统用来采集压力、流量、温度、推力、转速等发动机的状态参数,其组成部分见图2。

在该寿命试车中首次使用了由南京航空航天大学研制的气路静电监测系统,通过获取尾气总体静电荷水平的变化情况,实现对气路部件状态的实时监控,并提供发动机初始故障状态的早期预警信号^[5-8]。

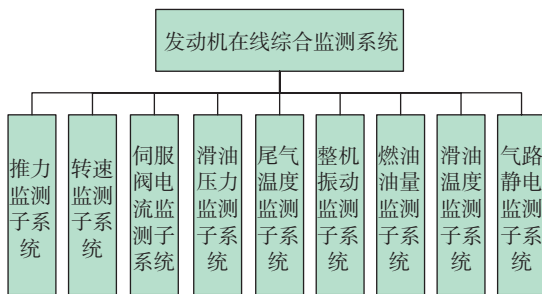


图2 发动机在线综合监测系统的组成部分

(2) 在线综合监测系统在寿命试车中的应用。

气路静电监测系统通过安装于发动机尾喷管处的静电传感器采集尾气的整体静电水平。当带电颗粒流经传感器时,其形成的静电场使静电传感器表面感应出极性相反的电荷。随着颗粒移动,其在静电传感器周围产生的电场在不断变化,致使静电传感器周围产生的电场也随之波动,由于静电传感器输出的感应信号比较微弱,需经过信号调理器调理后转换为电压信号,然后通过数据设备对信号进行采集和保存^[9-10],气路静电监测系统采集的数据及其实时处理结果的典型形式如图3所示。

图3中包括了两个静电传感器

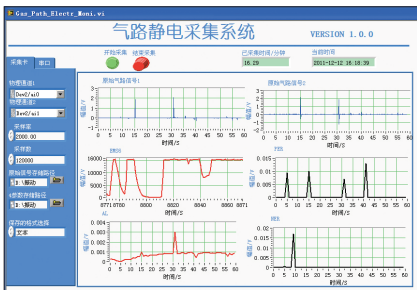


图3 气路静电采集系统运行效果

采集的静电信号(原始气路信号1和原始气路信号2),以及EMS6表示所采集的尾气浓度信号,AL、PER和NER分别表示原始气路信号1经过实时信号处理后得到的活动率水平、正事件率和负事件率^[6]。

基于模糊理论的多元在线监测信息融合

单一监测技术的获取的发动机状态十分有限,综合利用这些监测数据,可以大大提高对发动机状态监测的能力。

1 原始监测数据的预处理

由于各种监测方法得到数据,不论是数值还是量纲,均不相同,所以为后续分析处理需要对这些数据做必要的预处理。在线综合监测数据包括了推力 F 、转速 N 、燃油流量 f 、伺服阀电流 A 、滑油温度 T_L 、滑油压力 P 、排气总温 T_E 、整机振动 V_E 、尾气静电 G_E 。在这些监测数据中可以提取监测参数,并采用下式来对监测参数做预处理。

$$x_i = \left| \frac{D_i - m_i}{m_i} \right| (i=1, 2, 3, \dots, n), (1)$$

其中, D_i 为各监测参数的实测值; m_i 为监测参数的标准值。将各个参数的变化进行归一化处理,

$$X_i = \frac{x_i}{C_i}, (2)$$

其中, C_i 表示各个监测参数变化的上限值。在监测数据中提取相应监测参数及其正常上限值见表1。

在发动机寿命试车过程中通过在线综合监测系统获取的各个监测数据经过实时数据处理后,得到各监测参数的实际值。计算出对应的归一化的数据列 $X=\{X_i\}, i=1, 2, \dots, 9$, 其中 i 表示监测数据的种类数量,然后利用模糊理论进行信息融合。

2 多参数模糊信息融合

实际中,可把在用发动机分为

(正常、轻度劣化、重度劣化、需拆解4种状态),但对于每一种监测参数,可以根据单参数失效判据判别发动机所处的状态(正常、异常),建立各参数的模糊子集^[11]。

根据表1监测数据及其相关信息可以看出,参数变化值都是具有上限值限定的,所以知各参数隶属度函数均可取为偏小型隶属度函数^[12]。其中,

$$\mu(X_i) = \begin{cases} 1 & (X_i < 1) \\ e^{-0.1(X_i-1)} & (X_i > 1) \end{cases}, (3)$$

根据 $X=\{X_i\}, i=1, 2, \dots, 9$, 可以计算出对应的 $\mu(X) = \{\mu(X_i)\}$, 故可以获得表征此时发动机监测状态的归一化综合指

$$H = \sum_{i=1}^9 E_i \cdot \mu(X_i),$$

全面描述发动机的状态信息,其中 E_i 表示第 i 个监测参数对发动机当前状态的反映能力且 $\sum_{i=1}^9 E_i = 1$, 是由型号设计专家综合确定并给出的权重。

综合确定并给出的权重。

试车过程中发动机合理拆解期的确定

在试车过程中需要密切关注发动机的实际状态,并且根据发动机的状态确定是否对发动机进行拆解,以往都是根据预定的时间间隔进行定时的拆解检查,有时时间间隔比实际需求的拆解间隔小,往往会引起过度拆解的问题,导致一些因人为频繁拆解发动机而衍生的故障,影响了发动机寿命试车;反之,如果将时间间隔确定的比实际需求的拆解间隔大,会导致因一些潜在的故障未能及时发现而导致较大的故障损失。为了解决这个问题,利用在线综合监测系统实时的监测发动机状态并利用模糊理论将有效的监测参数进行信息融合。在此基础上利用决策模型,在发动机寿命试车过程中根据发动机当前状态动态地确定发动机拆解检查的时间。拆解决策模型可以描述为:

表1 监测数据及其相关信息

监测数据名称	提取参数名称	参数标准值(对应相应工况)	参数变化上限值 /%
推力 F	推力 D_f/N	$F+780$	10
转速 N	转速 $D_2/(r \cdot \min^{-1})$	$N+670$	10
燃油流量 f	流量 $D_3/(L \cdot h^{-1})$	$f+24$	5
伺服阀电流 A	电流 D_4/mA	$A+5$	12
滑油温度 T_L	温度 $D_5/^\circ C$	T_L+12	5
滑油压力 P	压力 D_6/kPa	$P+48$	5
排气总温 T_E	排温 $D_7/^\circ C$	T_E+50	10
整机振动 V_E	加速度 D_8/g	V_E+2	40
尾气静电 G_E	活动率水平 D_9/mV	0.0025	20
	正事件率 D_{10}	12	15
	负事件率 D_{11}	12	15

$$S = \begin{cases} \text{需拆解, } a_1 \leq H(t) < a_2 \\ \text{严重劣化, } a_2 \leq H(t) < a_3 \\ \text{轻度劣化, } a_3 \leq H(t) < a_4 \\ \text{正常, } a_4 \leq H(t) < 1 \end{cases} \quad (4)$$

由处理某一台同型号的发动机试车历史数据得到拆解决策模型中的区间点 $a_1=0, a_2=0.7, a_3=0.75, a_4=0.8$ 。在实际应用中,选取对应的发动机工况下各监测参数计算 $H(t)$,然后将 $H(t)$ 作为数据点绘制在坐标系中,若计算出的 H 值位于 $[0,0.7)$ 区域内,则需要拆解发动机;如果位于 $[0.7,0.75)$ 的区域内则需要重点关注发动机,随时准备拆解;如果位于 $[0.75,0.8)$ 进行持续关注;如果位于 $[0.8,1)$ 区域内,则发动机正

常运行。例如选取采集的寿命试车的监测参数数据按照上诉方法计算出的 $H(t)$ 如图 4 所示,发动机寿命试车到第 40h, H 值下降到 0.75 左右;并且从第 40~46h, H 值持续下降,需要重点关注,发动机存在着一定异常,到第 46h 以后发动机需要进行拆解检查,但是依据制定的实验大纲需要等到第 60h 后才进行拆解检查,故未在第 46h 进行分解。最终在第 50h 试验发动机发生剧烈喘振和异响,试验被迫中止,随后进行了分解检查,发现燃烧室存在大量积碳以及局部烧蚀故障。从图 4 可以发现第 46h 到第 50h 是持续下降,而且下降的速度很快(曲线的切线导数较大),说明了发动机状态恶化程度加快,该

模型能够准确表征发动机的状态,为合理确定发动机分解时间点提供了决策依据。

结束语

本文介绍了某小型航空涡喷发动机的基本情况,描述了使用的发动机试车台的基本情况,详细介绍了其各个组成部分。在某型航空涡喷发动机研制过程中,开展了对该发动机进行寿命试车的工作,为了准确获取发动机的运行状态使用了包含振动、滑油温度、气路静电等监测手段的在线综合监测系统来采集发动机的状态数据。通过对发动机状态数据进行处理提取了状态参数,利用模糊理论对这些状态参数进行了信息融合,最后为解决在寿命试车过程中依据发动机状态信息确定何时发动机拆解检查的问题,提出了利用信息融合后的状态信息确定发动机拆解时间的拆解决策模型,应用寿命试车过程中的实测数据对模型进行了验证。

本文有参考文献 12 篇,因篇幅所限,未能全部列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)

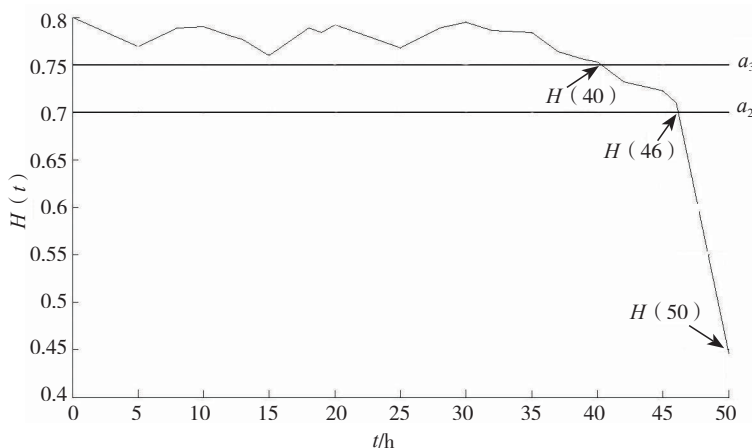


图4 发动机试车过程数据采集系统运行效果