

民用涡扇发动机燃油系统健康指标选取

丁佳伟^{1,2}, 郭迎清², 来晨阳²

(1. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129)

摘要: 针对民用涡扇发动机燃油系统工作环境恶劣、性能衰退情况频发、表征健康状态的量化指标缺乏的现状, 通过机理分析对发动机燃油系统关键部件(燃油计量装置、压差控制器、主燃油泵和增压关断活门)的健康指标选取策略进行了研究。基于已验证的某型民用涡扇发动机燃油系统 AMESim 模型, 注入计量活门内泄漏、电液伺服阀零偏增大、压差活门内泄漏、主燃油泵外泄漏等典型的性能衰退模式进行了性能衰退仿真, 并根据燃油系统可测量信息选取了计量活门组件、压差控制器、主燃油泵等作为特定性能衰退模式的健康指标。仿真结果表明: 所选取的健康指标对于典型性能衰退模式表现出了良好的监测能力, 可作为燃油系统健康状态量化指标评估标准, 为燃油系统健康管理和视情维修策略的制定提供参考。

关键词: 健康指标选取; 燃油系统; 性能衰退; 健康管理; 民用涡扇发动机

中图分类号: V233.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.04.016

Health Indicators Selection of Civil Turbofan Engine Fuel System

DING Jia-wei^{1,2}, GUO Ying-qing², LAI Chen-yang²

(1. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In view of the status of harsh working environment, frequent performance degradation and lack of quantitative indicators to characterize the health status of the civil turbofan engine fuel system, the health indicators selection strategy of the engine fuel system key components (fuel metering unit, differential pressure controller, main fuel pump and shut-off valve) was studied through mechanism analysis. Based on the verified AMESim model of a civil turbofan engine fuel system, the performance degradation simulation was carried out for the typical performance degradation modes such as the internal leakage of fuel metering valve, the increase of the zero offset of the electro-hydraulic servo valve, the internal leakage of differential pressure valve and the external leakage of the main fuel pump. According to the measurable information of the fuel system, the metering valve assembly, differential pressure controller and main fuel pump were selected as the health indicators of the specific performance degradation mode. The simulation results showed that the selected health indicators performs well in monitoring typical performance degradation modes, which can be used as the quantitative indicators of the fuel system health state evaluation, and provide a reference for the fuel system health management and the formulation of condition based maintenance strategy.

Key words: health indicators selection; fuel system; performance degradation; health management; civil turbofan engine

0 引言

燃油系统是实现航空发动机控制器功能的重要部件, 其性能变化将对控制指令的执行造成直接影响^[1-2]。燃油系统子部件众多, 包括燃油计量装置、燃油泵、变几何面积机构等, 这些部件工作环境恶劣, 性能衰退、故障和失效情况频发。根据 CFM 国际公

司的统计, 2008 年以后, CFM56-5B 发动机燃油系统燃油渗漏成为发动机最为多发的故障^[3]。燃油系统的故障和失效给发动机和飞机的运行安全带来严重威胁, 同时, 其性能衰退也会引发大量的民航航班延误和取消 (Delays and Cancellations, D&C)^[4]。因此有必要针对燃油系统各部件多发的性能衰退模式进行健康指标选取的相关研究, 基于机载可测信号, 直接或

收稿日期: 2020-09-03 基金项目: 国家科技重大专项 (2017-V-0015-0067) 资助

作者简介: 丁佳伟 (1997), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事航空发动机推力管理工作; E-mail: 435102919@qq.com。

引用格式: 丁佳伟, 郭迎清, 来晨阳. 民用涡扇发动机燃油系统健康指标选取[J]. 航空发动机, 2022, 48(4): 98-104. DING Jiawei, GUO Yingqing, LAI Chen-yang. Health indicators selection of civil turbofan engine fuel system[J]. Aeroengine, 2022, 48(4): 98-104.

间接选取有效的健康指标,反映当前燃油系统的健康状况,降低安全风险和经济损失。

目前,国外在燃油系统健康指标选取和健康管理领域的研究内容披露不多,Lamoureux等^[4]对民用涡扇发动机燃油系统的主燃油泵、燃油计量装置、执行机构等部件的失效模式分析、健康指标选取做出了细致的工作,并基于SVR-Kriging方法构建了燃油系统代理模型,在考虑环境和结构不确定性的情况下,对健康指标体系进行了验证。在中国,多数学者对于燃油系统部件的故障诊断技术开展了大量研究。潘阳等^[5]基于发动机逆模型和执行机构数学模型,对发动机燃油计量装置执行机构及其双余度传感器(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)的故障检测与故障隔离方法进行了研究;芦海洋等^[6]基于卡尔曼滤波器设计了主燃油计量装置故障残差生成器,并对作动筒卡滞、电液伺服阀卡滞和漂移故障进行了仿真验证,有效降低了故障误报率和漏报警率;赵志远等^[7-8]基于机理分析建立了发动机燃油系统的系统级数学模型,并开发了燃油系统全部件的故障诊断算法。另外,中国少数学者对于燃油系统单一部件的健康指标选取和验证也开展了一些工作,来晨阳等^[9-10]选取了燃油计量装置、主燃油泵的有效健康指标并进行了验证。

综上所述,在燃油系统健康指标选取和健康管理技术领域,国外的研究提供了较为完整的解决思路 and 方案,具有一定的参考价值;中国多数研究侧重于故障诊断技术和单一部件的健康指标选取和验证,缺乏针对多部件的系统性的健康指标定义,与国外的研究水平还有较大差距。因此,本文以某型民用发动机燃油系统为研究对象,针对4种典型部件多发的性能衰退模式制定健康指标选取策略,基于燃油系统AMESim模型进行性能衰退仿真,选取有效的健康指标。

1 燃油计量活门组件

1.1 工作原理及性能衰退模式分析

燃油计量活门组件包括电液伺服阀、燃油计量活门(Fuel Metering Valve, FMV)及LVDT,主要功能为基于计量活门位移指令控制计量活门的精准作动,FMV控制回路如图1所示。

燃油计量活门组件的工作原理为:发动机电子控制器(Electronic Engine Controller, EEC)基于比例积

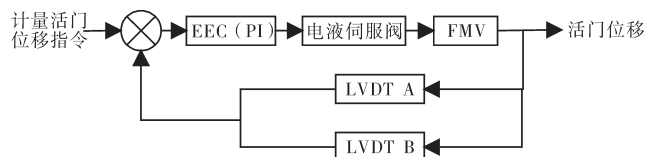


图1 FMV控制回路

分(Proportional Integral, PI)控制规律向FMV控制回路输入代表燃油流量需求的计量活门位置期望信号,与FMV的反馈位置信号相比较得到位置误差信号,输入控制器中计算得到控制电流信号,通过电液伺服阀调节FMV两端伺服油压力,从而控制FMV作动,实现FMV位置闭环控制^[11]。

通过压差控制器控制FMV前后的燃油压力差值不变,使得FMV出口的燃油流量 Q_{FMV} 仅由FMV的开度面积决定

$$Q_{FMV} = \mu A_{FMV} \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (1)$$

式中: μ 为流量系数; A_{FMV} 为FMV的流通面积; ΔP 为计量活门前后压差; ρ 为燃油密度。

燃油计量活门组件承担着输送计量燃油的重要作用,而随着服役时间的延长,其部件FMV、电液伺服阀和LVDT传感器易发生性能衰退,尤其是FMV需要跟随发动机控制需求的变化频繁作动,易发生磨损,导致FMV的燃油泄漏、摩擦力增大,以及电液伺服阀油滤堵塞、零偏值变化等多种性能衰退现象。本文考虑将多发的FMV内泄漏和电液伺服阀零偏增大作为典型的性能衰退模式进行研究。

1.2 健康指标选取

电液伺服阀的输出伺服油流量增益曲线可以直观反映出FMV控制回路的性能变化,因此可以通过监测控制电流与电液伺服阀输出流量间的关系对其性能进行监测。但在发动机燃油系统中,电液伺服阀未配置流量传感器,无法直接获取电液伺服阀的输出流量信息。

针对该问题,本文采用了利用FMV控制回路的控制电流和计量活门作动速度间的对应关系曲线(以下简称电流-速度曲线)进行性能监测的方法^[12-13]。在发动机燃油系统中,燃油计量活门作动速度 V 与电液伺服阀输出流量 Q 之间遵循正比例关系

$$Q = V \cdot S \quad (2)$$

式中: S 为伺服油与计量活门的作用面积。

S 在计量活门工作过程中不发生改变,可视为常数;而 V 可通过对LVDT传感器输出的位移信号进行

微分运算获得。计算 V 与 S 的乘积得到电液伺服阀的输出流量数据,即通过监测计量活门作动速度相对于控制电流的变化,间接反映电液伺服阀的流量变化,进而反映FMV的性能变化。

基于上述分析,可根据电流-速度曲线来选取适宜的健康指标。

为了清晰地展示2种性能衰退模式对电流-速度曲线的影响,在燃油计量活门组件AMESim模型中注入FMV内泄漏、电液伺服阀零偏变化性能衰退模式进行仿真。燃油计量活门组件AMESim模型如图2所示。

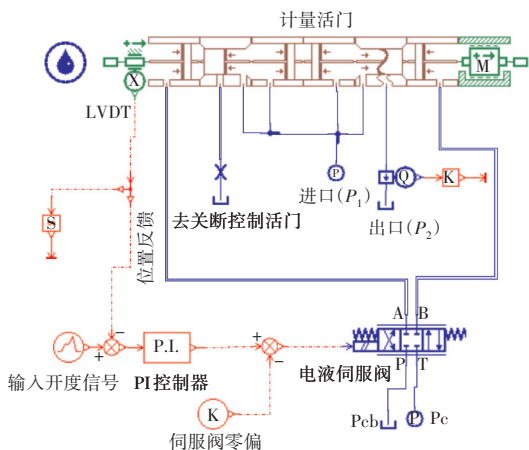


图2 燃油计量活门组件AMESim模型

当燃油计量活门出现内泄漏及零偏增大时,其性能衰退仿真结果如图3所示。为了更好地观察其变化趋势,对原始曲线进行线性拟合处理,线性拟合后速度随电流变化的曲线如图4所示。

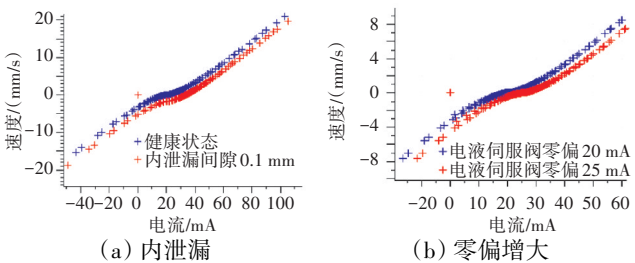


图3 燃油计量活门性能衰退仿真结果

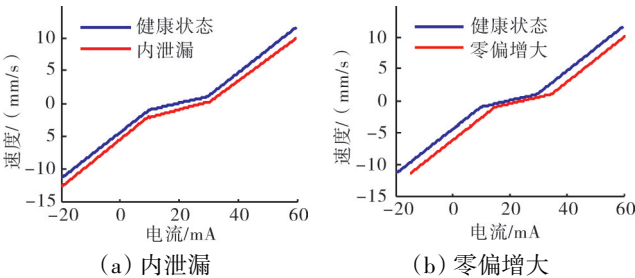


图4 线性拟合后速度随电流变化的曲线

从图3、4中可见,当燃油计量活门发生内泄漏和零偏变化的性能衰退时,电流-速度曲线均会发生明显变化且变化趋势不同(分别为向下和向右移动),因此可基于线性拟合后的电流速度曲线,选取其斜率信息及主要特征点的坐标信息作为检测内泄漏及零偏变化性能衰退模式的健康

参数(Health Indicators, HI),选取的特征点如图5所示,图中黑框为燃油计量活门发生内泄漏或零偏但仍满足燃油计量精度要求的电流-速度曲线范围^[14]。燃油计量活门组件健康指标见表1。

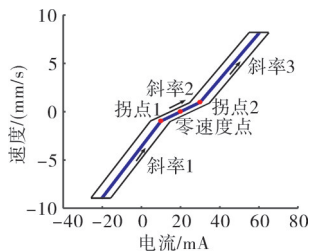


图5 燃油计量活门性能衰退特征点选取

表1 燃油计量活门组件健康指标

健康指标	描述	性能衰退模式
x_1	拐点1横坐标	燃油计量活门内泄漏, 电液伺服阀零偏变化
x_2	拐点2横坐标	
y_1	拐点1纵坐标	
y_2	拐点2纵坐标	
x_0	零速度点横坐标	
S_1	斜率1	
S_2	斜率2	
S_3	斜率3	

2 压差控制器

2.1 工作原理及性能衰退模式分析

压差控制器由压差活门和回油活门构成,压差活门的功能是感受计量活门前燃油压力 P_1 与计量活门后燃油压力 P_2 的差值;回油活门根据压差调节回油量维持FMV前后压差 ΔP 恒定。压差控制器的构成及工作环境如图6所示。

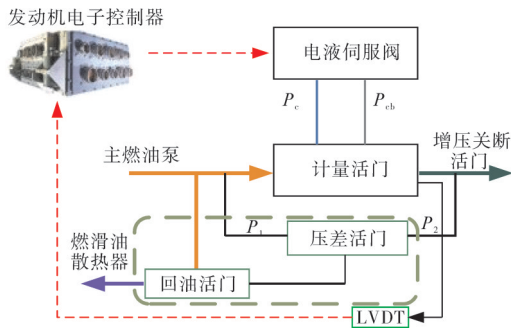


图6 压差控制器的构成及工作环境

压差控制器 AMESim 模型如图 7 所示。从图中可见,当 P_1 过大、 P_2 不变时,计量活门前后压差增大,压差活门阀芯左移,压差活门左侧出油孔开度增大,更多的压差活门腔中的计量活门后燃油与计量活门前燃油汇成一股油路,汇合油路的油压降低并进入回油活门弹簧腔中,因为 P_1 增大而弹簧腔中燃油压力降低,使得回油活门阀芯左移,回油活门出油孔开度增大,更多计量活门前燃油流回燃滑油散热器前,导致 P_1 减小,进而维持计量活门前后压差恒定;相反,当 P_2 过大、 P_1 不变时,计量活门前后压差减小,压差活门阀芯右移,压差活门左侧出油孔开度减小,通往回油活门弹簧腔中的计量活门后燃油减少,使得回油活门弹簧腔中燃油压力增大, P_1 不变,因此回油活门阀芯右移,流回燃滑油散热器的计量活门前燃油量减少,使得 P_1 增大,保证计量活门前后压差不变。

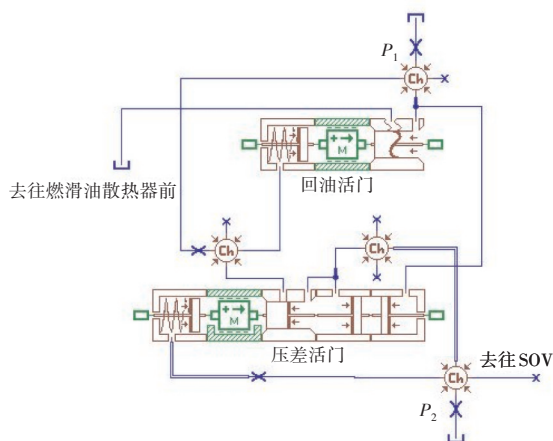


图7 压差控制器 AMESim 模型

发动机工作条件多变,导致 FMV 前后的燃油压力不断改变,压差控制器需要不断作动,以保证燃油压差恒定。随着飞行时间的延长,活门易发生磨损,进而导致泄漏;活门弹簧往复运动频繁,易发生疲劳失效,出现弹簧预紧力减小甚至弹簧断裂等情况。因此,本文主要考虑将压差活门内泄漏和回油活门弹簧预紧力减小作为压差控制器的典型性能衰退模式。

2.2 健康指标选取

当压差控制器处于健康状态时,FMV 前后的燃油压差始终保持给定值,可通过控制计量活门位移控制流量输出。该型燃油系统设计数据给定的 FMV 作动位移和输出燃油流量间的对应关系曲线简称位移流量曲线,如图 8 所示。

当压差控制器发生性能衰退时,直接导致计量活门前后压差不稳定,进而无法输出期望的燃油流量;并且由于 ΔP 不确定,无法通过 LVDT 测量信号根据式(1)计算输出的真实燃油流量。

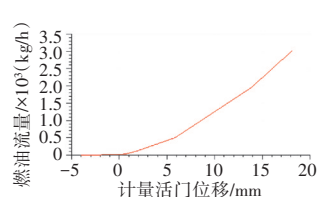


图8 FMV 位移流量曲线

在本文研究的民用涡扇发动机燃油系统中,配置有燃油流量传感器,可基于燃油流量传感器的测量信号得到实际运行中计量活门的位移流量曲线,并与给定的位移流量曲线进行比较,判断压差控制器是否发生了性能衰退。

基于燃油系统模型,分别注入压差活门的内泄漏和回油活门弹簧预紧力减小 2 种性能衰退模式进行仿真,得到不同性能衰退强度下的位移流量曲线,并对其进行线性拟合处理,其仿真结果分别如图 9、10 所示。从图中可见,当回油活门中的弹簧预紧力降低时,计量活门的位移与输出燃油流量的关系也发生了变化,但相比于压差活门内泄漏性能衰退时,其变化幅度较小。当弹簧预紧力减小时,压差控制器的输出压差相对给定值减小,随着弹簧预紧力的不断减小,计量活门的输出燃油流量小幅减少,对原始曲线进行线性拟合处理后,拟合后曲线的斜率相比健康状态时小幅度减小。

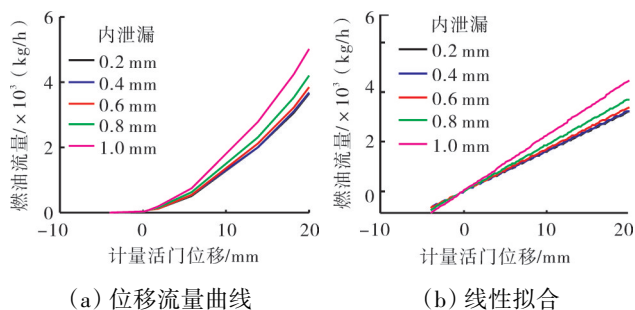


图9 压差活门内泄漏仿真结果

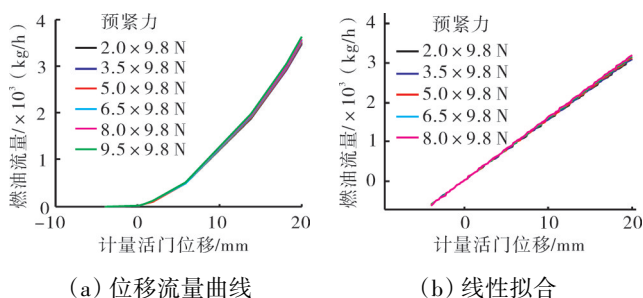


图10 回油活门弹簧预紧力减小仿真结果

基于以上分析,可以选取计量活门开度流量曲线的线性拟合斜率 D_p 作为压差控制器组件的健康指标,见表2。

表 2 压差控制器健康指标		
健康指标	描述	性能衰退模式
D_p	计量活门开度流	压差活门内泄漏、回油
	量曲线拟合斜率	活门弹簧预紧力减小

3 主燃油泵

3.1 工作原理及性能衰退模式分析

燃油泵由低压泵、主油滤、主燃油泵和自洗油滤构成,共同工作为发动机燃烧室和执行机构提供高压清洁燃油,燃油泵结构及其工作环境如图 11 所示。其工作原理为:飞机油箱中的燃油先流入低压泵增压后与回油活门输出的燃油混合进入燃滑油散热器,散热器输出燃油进入主油滤进行过滤,之后进入主燃油泵进一步增压,增压后的高压燃油分为 2 股,1 股进入燃油计量装置,计量后流入燃烧室进行燃烧,另 1 股经自洗油滤过滤后流入各执行机构作为伺服燃油源。

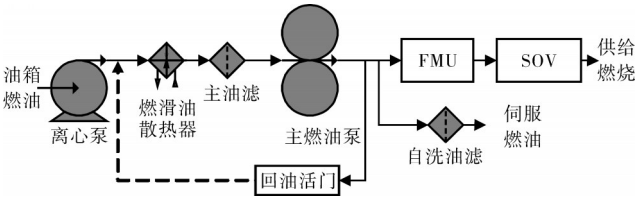


图 11 燃油泵结构及工作环境

主燃油泵是燃油泵的核心组件,承担着对燃油增压并输出高压燃油的重要作用。主燃油泵在飞行过程中长期受到振动、过载、高低温转换、油液侵蚀等环境应力的影响,易出现齿面磨损、油液泄漏等性能衰退情况。内泄漏指经过主燃油泵后的高压油通过齿轮端面与侧盖板之间的端面间隙、齿顶与壳体之间的径向间隙、齿轮啮合点处的间隙流向低压腔;外泄漏指经过主燃油泵后的高压燃油通过轴封处间隙流向外界。

3.2 健康指标选取

在目前的燃油系统可测信息中,尚无传感器可直接反映主燃油泵的运行状态及其性能。因此,必须考虑从其他可测信号中间接反映出齿轮泵的性能信息^[15-16]。

在起动过程中,由于发动机转速的持续提高,主

燃油泵的转速也持续提高,使得主燃油泵后燃油压力不断提高,当泵后油压高于 SOV 弹簧力与泵前压力之和时,SOV 打开。因此,当主燃油泵的性能发生变化时,在相同泵转速的情况下,泵后的燃油压力有所不同,即 SOV 的受力情况相比健康状态下发生了变化,导致 SOV 的开启时刻对应的转速值发生变化。

基于燃油系统 AMESim 模型,对主燃油泵内泄漏及外泄漏性能衰退模式进行仿真,SOV 开启时刻对应的转速变化如图 12 所示。从图中可见,当主燃油泵发生内泄漏和外泄漏性能衰退时,SOV 在发动机起动阶段的开启时刻对应的高压转子转速明显提高,即需要更高的转速带动主燃油泵才能将泵后燃油压力提升到足以打开 SOV 的水平。此外,在泄漏间隙相同的情况下,外泄漏衰退模式 SOV 开启时刻对应转速值大于内泄漏性能衰退模式,即外泄漏对主燃油泵的性能影响更大。

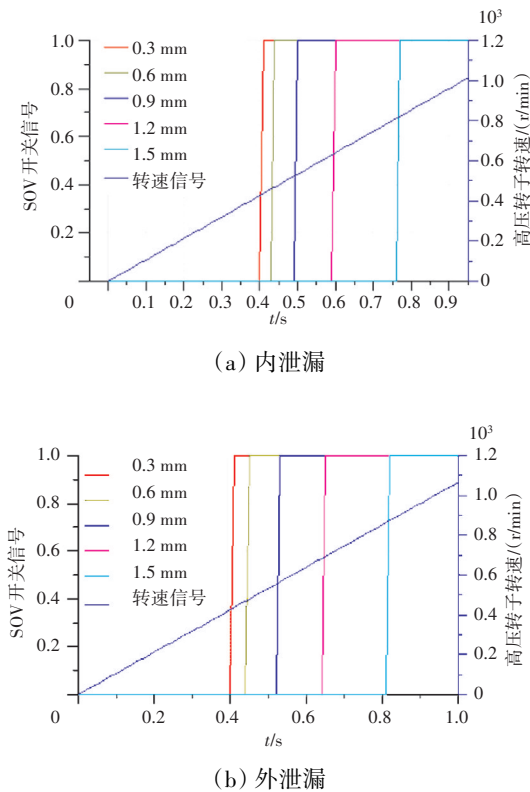


图 12 SOV 开启时刻对应的转速变化

基于以上分析,对于主燃油泵,可以采用在发动机起动阶段 SOV 开启时刻对应的高压转子转速值 N_{2SOV} 作为主燃油泵的 HI 反映其性能变化,可检测的目标性能衰退模式为主燃油泵内泄漏和外泄漏。主燃油泵健康指标见表 3。

表 3 主燃油泵健康指标

健康指标	描述	性能衰退模式
N_{2SOV}	SOV 开启时的对应 转速值	主燃油泵内泄漏、外 泄漏

4 增压关断活门

4.1 工作原理及性能衰退模式分析

燃油系统停车装置由停车电磁阀、转换活门、增压关断活门 SOV 构成,其结构如图 13 所示。



图 13 燃油系统停车装置结构

燃油系统停车装置工作原理为:当飞行停车电磁阀下达停车指令时,转换活门与泵后伺服燃油油路相连的油孔开度增大,高压伺服燃油流入,经转换活门进入 SOV 的弹簧腔,由高压伺服燃油压力与 SOV 弹簧弹力形成合力,关闭 SOV,切断计量活门后面通往喷嘴油滤的燃油油路,不再向发动机燃烧室供油,实现发动机停车。SOV 在高压燃油环境下作动,承担着切断燃油供给的重要作用,SOV 工作原理如图 14 所示。发动机停车时,SOV 工作原理满足

$$P_2 \cdot A \leq P_k \cdot A_k + F_0 + K \cdot x \tag{3}$$

式中: A 为计量活门后燃油与 SOV 之间的油液作用面积; P_k 为 SOV 左侧油孔来油压力,当停车电磁阀下达停车指令或 EEC 控制发动机停车时, P_k 分别为泵后伺服燃油压力 P_{sf} 或计量活门前燃油压力 P_1 ; A_k 为弹簧腔油液作用面积; F_0 为 SOV 内部弹簧预紧力; $K \cdot x$ 为弹簧弹力是 SOV 弹簧劲度系数与弹簧位移的乘积。

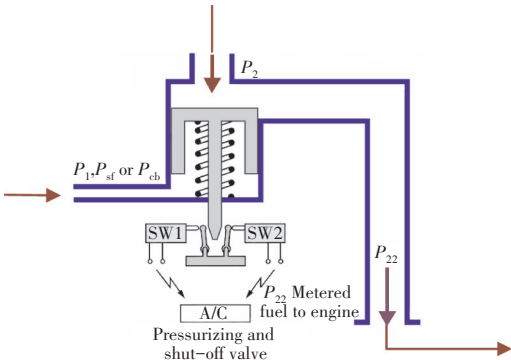


图 14 SOV 工作原理

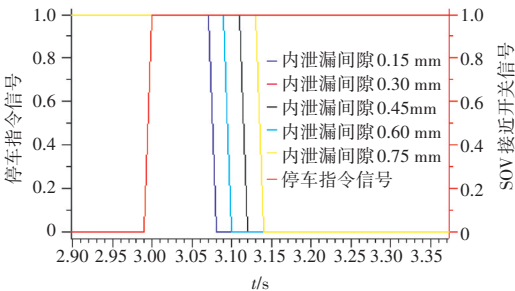
分析式(3)可知,影响 SOV 正常工作的主要因素即为不等式不等号右边的合力大小,合力大于计量活

门后燃油压力作用力,才能保证 SOV 正常关闭。当 P_k 和弹簧预紧力减小或弹簧本身性能退化时,影响不等号右侧合力大小,则认为 SOV 发生了性能衰退。因此,本文在进行健康指标的选取时考虑将 SOV 内泄漏和弹簧预紧力减小作为典型性能衰退模式。

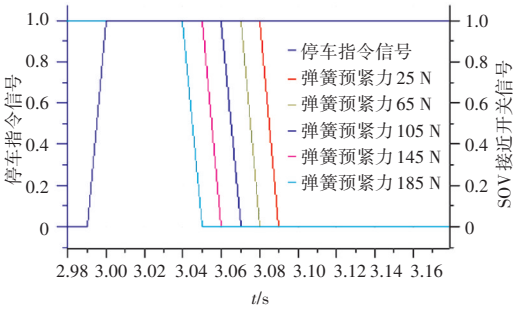
4.2 健康指标选取

在该型燃油系统中,SOV 配置了接近开关传感器,为开关量信号。若 SOV 发生性能衰退,当下达停车指令信号后,SOV 关闭时间会延长,具体反映在 SOV 的接近开关信号中。

基于燃油系统 AMESim 模型,在 SOV 模型中增加泄漏模块以仿真其内泄漏性能衰退情况;调整模型中弹簧预紧力参数实现弹簧预紧力减小性能衰退的注入。SOV 接近开关信号变化的仿真结果如图 15 所示。



(a) SOV 内泄漏



(b) SOV 弹簧预紧力减小

图 15 SOV 接近开关信号变化仿真结果

从图中可见,在第 3 s 下达停车指令后,SOV 健康时关闭时间为 50 ms,随着 SOV 内泄漏间隙的增大或弹簧预紧力减小,关闭时间随之延长,因此可选择发动机停车阶段的 SOV 接近开关信号的关闭时间 D_{SOV} 作为 SOV 的 HI。增压关断活门健康指标见表 4。

表 4 增压关断活门健康指标

健康指标	描述	性能衰退模式
D_{SOV}	SOV 接近开关信号 关闭时间	SOV 内泄漏、弹簧预 紧力减小

5 结 论

(1)本文建立的燃油系统典型性能衰退 AMESim 仿真模型可以有效地模拟部件内泄漏、外泄漏、零偏增大、弹簧预紧力减小等衰退模式;

(2)针对燃油计量活门组件、压差控制器、主燃油泵和增压关断活门,分别基于电流-速度拟合曲线、计量活门开度流量拟合曲线、高压转子转速、SOV 接进开关信号选取了对应的健康指标;

(3)仿真验证结果表明所选取的健康指标能够量化反映燃油系统部件的性能衰退强度,可为燃油系统部件健康评估提供参考。

参考文献:

- [1] 张绍基.航空发动机控制系统的研发与展望[J].航空动力学报, 2004,19(4):375-382.
ZHANG Shaoji. A review of aeroengine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4):375-382. (in Chinese)
- [2] 吴文斐,郭迎清,李睿,等.涡扇发动机液压机械主控制系统建模与仿真分析[J].航空发动机,2011,37(1):16-19.
WU Wenfei, GUO Yingqing, LI Rui, et al. Modeling and simulation analysis of hydro-mechanical main control system for turbofan engine [J]. Aeroengine, 2011, 37(1):16-19. (in Chinese)
- [3] 王天义.CFM56-5B 发动机燃油系统典型故障分析[J].价值工程, 2017,36(13):97-99.
WANG Tianyi. Typical failure analysis of CFM56-5B engine fuel system[J]. Value Engineering, 2017, 36(13):97-99. (in Chinese)
- [4] Lamoureux B. Development of an integrated approach for PHM-prognostics and health management: application to a turbofan fuel system [D]. Paris: Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, 2014.
- [5] 潘阳,李秋红,姜洁,等.航空发动机燃油系统执行机构故障诊断及验证[J].航空发动机,2016,42(4):30-35.
PAN Yang, LI Qiu hong, JIANG Jie, et al. Fault diagnosis and validation for aeroengine fuel system actuator[J]. Aeroengine, 2016, 42(4):30-35. (in Chinese)
- [6] 芦海洋,王曦.基于卡尔曼滤波器的主燃油计量装置故障诊断[J].航空发动机,2017,43(2):17-22.
LU Haiyang, WANG Xi. Fault diagnosis of main fuel metering device based on Kalman filter[J]. Aeroengine, 2017, 43(2):17-22. (in Chinese)
- [7] 赵志远.涡扇发动机燃油系统健康管理技术研究[D].西安:西北工业大学,2018.
ZHAO Zhiyuan. Research on the health management technology of turbofan engine fuel system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [8] 赵志远,郭迎清,姜国龙,等.民用涡扇发动机燃油系统建模与仿真[C]//第十八届航空发动机自动控制专业学术交流会.江苏无锡:中国航空学会,2018:839-846.
ZHAO Zhiyuan, GUO Yingqing, JIANG Guolong, et al. Modeling and simulation of fuel system of civil turbofan engine[C]//The 18th Academic Conference of Aeroengine Automatic Control. Wuxi: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2018:839-846. (in Chinese)
- [9] 来晨阳,郭迎清,于华锋.基于 RF-SVR 的燃油计量装置性能衰退检测和剩余寿命估计方法[J].航空动力学报,2019,34(7):1624-1632.
LAI Chenyang, GUO Yingqing, YU Huafeng. Fuel metering unit performance degradation detection and remaining useful life estimation method based on RF-SVR[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(7):1624-1632. (in Chinese)
- [10] Lai C, Guo Y, Mao H. Main fuel pump health monitoring method based on Kriging surrogate model[C]//2019 Chinese Control Conference (CCC). Guangzhou: IEEE, 2019:5112-5117.
- [11] 余玲,叶志锋.航空发动机燃油计量装置的 AMESim 建模[J].现代机械,2014(5):26-29.
YU Ling, YE Zhifeng. AMESim modeling of aero engine fuel metering device[J]. Modern Machinery, 2014(5):26-29. (in Chinese)
- [12] Lamoureux B, Mechbal N, Masse J R. Numerical key performance indicators for the validation of PHM health indicators with application to a hydraulic actuation system[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013, 33:43-48.
- [13] Lamoureux B, JeanRémi M, Mechbal N. An approach to the health monitoring of the fuel system of a turbofan[C]//IEEE Conference on Prognostics & Health Management, 2012, Denver: IEEE, 2012:1-6.
- [14] 姚华,张天宏.航空发动机控制系统设计技术[M].北京:科学出版社,2017:231-233.
YAO Hua, ZHANG Tianhong. Aeroengine control system design technology[M]. Beijing: Science Press, 2017:231-233. (in Chinese)
- [15] Lamoureux B, Mechbal N, Massé J. A combined sensitivity analysis and Kriging surrogate modeling for early validation of health indicators[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 130:12-26.
- [16] Lamoureux B, Massé J R, Mechbal N. An approach to the health monitoring of a pumping unit in an aircraft engine fuel system[C]//Proceedings of the European Conference of the PHM Society 2012. Dresden: IEEE, 2012:121-128.

(编辑:刘 静)