基于快速原型的涡扇发动机气路 部件在线健康监控系统设计



胡宇*,李魁,张寅,孙振生,金国锋 火箭军工程大学,陕西西安 710025

摘 要:为实现涡扇发动机全包线范围内具有较高精度的快速实时仿真,结合快速原型技术和发动机非线性模型设计了一种气路部件在线健康监控系统。该系统采用涡扇发动机非线性模型模拟真实发动机进行实时计算,并将基于优化拟合法获得最优的发动机线性化模型融入扩展Kalman滤波算法,对气路部件健康参数进行实时跟踪,将该跟踪方法运用于基于CompactDAQ和CompactRIO平台设计的发动机在线故障诊断原型系统进行仿真试验验证。仿真结果表明,基于快速原型技术与发动机非线性模型构建的在线健康监控系统能够实现对气路部件故障的有效诊断,平均正确率达到98.28%。

关键词:涡扇发动机,故障诊断,快速原型,实时跟踪,气路部件

中图分类号:V233.7 3

文献标识码:A

涡扇发动机由于其结构复杂程度高且工作环境恶劣, 在役期间受到外物吸入、自身零件脱落、磨损侵蚀、过热,以 及积垢等影响极易发生性能蜕化,甚至出现故障。能够准 确有效地对气路部件健康状态进行评估,是实现涡扇发动 机状态监测、故障诊断与定位、任务优化配置的前提,并能 最大程度地降低发动机维护成本、提高飞行的安全性与可 靠性^[1]。

国内外学者对气路部件故障诊断已开展了大量的研究。其中,Kalman滤波方法^[2,3]作为一种实时递推的最优估计方法,备受业内人士青睐。早在20世纪80年代末,Luppold等^[4]就将Kalman滤波器运用于发动机气路健康监测。由于早期研究的Kalman滤波算法基于发动机线性化模型,其滤波精度依赖于线性模型^[5]的精度。为降低对发动机线性化模型的依赖,许多学者提出了基于发动机非线性模型的Kalman滤波算法^[6],该方法极大地提高了气路故障诊断精度,并扩大了适用范围。近年来,Julier等^[7]提出的无迹Kalman滤波(Unscented Kalman Filter,UKF)能够很好地适用于非线性研究对象,它通过构造一组确定的加权样

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.010

本来近似非线性分布,能够实现对强非线性涡扇发动机的 参数估计和故障诊断。Dewallef等¹⁶运用UKF算法设计了 一种具有较强鲁棒性的,能够对传感器和气路部件同时进 行故障诊断的双重Kalman滤波算法。Kobayashi等^[8]采用 一组Kalman滤波器实现对航空发动机传感器、执行机构和 部件的故障诊断。仇小杰^[9]等在Kobayashi的基础上深入 研究了部件和传感器同时发生故障的诊断方法。为了对故 障诊断算法进行快速高效的测试和验证,完成设计阶段系 统软硬件方案初步可行性评估,近年来,部分学者研究了快 速原型设计技术并将其运用于硬件在回路仿真测试[10]。鲁 峰等印结合发动机基线模型和加权最小二乘算法提出了一 种气路故障诊断的快速原型设计方法,其提出的基线模型 是在确定的发动机工作状态下并根据相似变换原理和插值 修正法获得,得到了较高的基线精度。实际上,通过真实测 量参数确定的发动机工作状态往往有限,往往难以建立全 包线内符合精度要求的基线模型[12]。而发动机非线性模型 在全状态下具有较高精度,能够更好地适应包线内不同状 态下的仿真验证。因此,本文结合发动机非线性模型与快

收稿日期:2019-04-08;退修日期:2019-04-18;录用日期:2019-04-25

基金项目: 航空科学基金(201605U8002);西安市科技计划(201805048YD26CG32-2);四川省科技计划(19ZDZX0037)

*通信作者. Tel.: 15289360632 E-mail: huyu1222@163.com

引用格式 : Hu Yu, Li Kui, Zhang Yin, et al. Research on online health monitoring system for gas path components of turbofan engine based on rapid prototyping[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(05):51-58. 胡宇,李魁,张寅,等. 基于快速原型的涡扇发动机 气路部件在线健康监控系统设计[J]. 航空科学技术, 2019, 30(05):51-58.

速原型技术设计了一种在线气路部件故障在线监测系统。 该系统以发动机非线性系统模型替代真实发动机进行实时 计算,结合优化拟合法获得的线性化模型和扩展Kalman滤 波算法对气路故障进行实时跟踪,并在基于CompactDAQ 和CompactRIO平台开发的发动机在线故障诊断原型系统 实现对气路部件状态的实时跟踪与故障诊断。

1 涡扇发动机气路部件在线故障诊断

1.1 发动机非线性系统模型

本文以双涵道、非加力式分开排气涡轮风扇发动机作 为研究对象,其结构和特征截面划分示意图如图1所示。 涡扇发动机部件级非线性模型表示为:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x,u) \\ y = g(x,u) \end{cases}$$
(1)

式中:状态变量 $x \in R^n$,控制变量 $u \in R^m$ 和输出变量 $y \in R^p$ 。



图1 涡扇发动机部件划分与特征截面符号

Fig.1 Engine layout with station numbering

迭代计算获得非线性模型时,一般首先将其转化为残 差形式:

$$F_i(X) = e_i, \ i = 1, \cdots, N$$
 (2)

式中:X为迭代变量。采用常规的 Newton-Raphson 算法求 解时,迭代表达式为:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - J^{-1}F(X^{(k)}), \quad k = 0, 1, 2, \cdots$$
(3)

式中:*X*^(k)为进行迭代前的值,*X*^(k+1)为迭代一次后的修正 值,*J*为雅可比(Jaccobian)矩阵,求解采用其中心差分形式:

$$J(ij) = \frac{F_{i}!_{x_{j}=x_{j}^{(k)}+\Delta_{j}} - F_{i}!_{x_{j}=x_{j}^{(k)}-\Delta_{j}}}{2 \cdot \Delta_{j}}$$
(4)

该方法对初猜值比较敏感,容易出现不收敛的情况,特别对于具有强非线性的工作阶段,并且每次迭代均需对各部件重新计算以获得Jaccobian矩阵,当J较小时,求逆过程近似无解。为解决该问题,本文提出结合Broyden方法^[13]与拟Newton法(称为Newton-Broyden算法)来求解非线性方程组,该方法可通过递推方式直接获得Jaccobian矩阵的逆矩阵:

$$\boldsymbol{J}_{k}^{-1} = \boldsymbol{J}_{k-1}^{-1} + \frac{(\boldsymbol{s}_{k} - \boldsymbol{J}_{k-1}^{-1} \boldsymbol{y}_{k}) \boldsymbol{s}_{k}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{J}_{k-1}^{-1}}{\boldsymbol{s}_{k}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{J}_{k-1}^{-1} \boldsymbol{y}_{k}}$$
(5)

式中: $s_k = X_k - X_{k-1}, y_k = F(X_k) - F(X_{k-1})$ 。迭代过程中将 J_k^{-1} 直接代入式(3)中,避免Jaccobian矩阵的求逆求解过程, 迭代次数虽有所增加,但却减少了计算耗时。

在较小的扰动范围内,选定发动机多个稳态工作点,对 涡扇发动机非线性方程组进行求解。对于每个稳态工作点 选用同样的初猜值,两种算法的迭代终止条件是误差量小于 10⁻⁸,计算对比结果见表1。从计算对比结果可以看出, Newton-Raphson算法迭代次数少、耗时长,Newton-Broyden 算法迭代次数多、耗时短。但相比而言,Newton-Broyden算 法避免了Jaccobian矩阵求逆无解不收敛的缺点。

表1	发动机非线性方程组求解计算结果对比
Table 1	Comparison of the results of nonlinea
	equations of engine

稳态工作点		Newton-l	Raphson 法	Newton-Broyden法		
<i>H</i> /km	Ma	$N_l / \%$	迭代次数	计算时间/s	迭代次数	计算时间/s
0	0	$100\% N_{l, design}$	3	0.4432	5	0.4419
0.5	0.6	$100\% N_{l, design}$	4	0.5502	7	0.5368
4	0.6	$70\%N_{l, m design}$	6	0.8141	11	0.7046
6	0.8	$70\% N_{l, design}$	7	0.9405	14	0.8291
10	1	$90\%N_{l,design}$	7	0.9606	15	0.8796

1.2 发动机气路部件在线故障诊断

为了实现对气路部的在线故障诊断,本文以非线性部件级模型来模拟真实发动机,采集获得发动机关键部件的测量数据,并将最优的发动机线性化模型融入扩展Kalman 滤波算法形成EKF算法,递推估计发动机气路部件健康参数的蜕化量 Δh ,根据蜕化量 Δh 分析判断发动机的健康状态,该在线故障诊断方法的基本原理如图2所示。

为实现气路部件状态在线跟踪与实时故障分析,首先 需要建立具有较强实时性的涡扇发动机线性化模型。考虑 到气路部件出现蜕化的情况,将表征发动机气路部件健康 状态的参数h作为控制变量,分别对控制变量u与健康参数 h进行小扰动得到状态变量与输出变量的阶跃响应数据作 为优化拟合法迭代过程的输入输出量,经过优化拟合法的 迭代过程,得到包含健康参数的最优线性化模型:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u + L \Delta h + w \\ \Delta y = C \Delta x + D \Delta u + M \Delta h + v \end{cases}$$
(5)

式中:w和v分别为系统和测量噪声, $h=[\eta_{fan},m_{fan},\eta_{hpc},m_{hpc},\eta_{hpt},m_{hpt},m_{hpt},m_{hpt},m_{hpt}]$ 分别为风扇、压气机、高压涡轮和低压涡轮的效率系数和流量系数。将h扩展为状态量,原状态变量







模型变为增广状态变量模型:

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = AI\Delta x + BI\Delta u + w \\ \Delta y = CI\Delta x + DI\Delta u + v \end{cases}$$
(6)

式中: $\Delta \dot{X}$ 为增广的状态变量 $\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta h \end{bmatrix}$,增广的状态变量模型的 系数矩阵分别为 $AI = \begin{bmatrix} A & L \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $BI = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$, $CI = \begin{bmatrix} C & M \end{bmatrix}$,DI = D 此时 建立的状态变量模型因素连续的状态变量模型

D。此时,建立的状态变量模型属于连续的状态变量模型, 而Kalman滤波过程实际上是一个离散的过程,为此,需要 对连续系统进行离散化处理,得到离散后的增广状态变量 模型为:

$$\begin{cases} \Delta X_{k+1} = F \Delta X_k + I \Delta u_k + w_k \\ \Delta y_k = G \Delta X_k + H \Delta u_k + v_k \end{cases}$$
(7)

式中:离散过程计算其系数矩阵分别为 $F = e^{AI \cdot T}$ 、 $I = BI \cdot T + \frac{AI \cdot BI \cdot T^2}{2}$ 、G = CI 和 H = DI,分别表示离散化的系数 矩阵,T为采样周期, w_k 和 v_k 分别为系统和测量噪声,二 者为不相关的白噪声信号。当噪声方差确定不合适时, 会造成滤波器产生较大的滤波误差,进一步影响着诊断 结果。因此,在进行Kalman滤波之前要多次试验寻找适 当的噪声方差,提高诊断准确性^[14-16],限于篇幅本文就不 详细介绍。

为了获得准确的线性化状态变量模型,本文结合改进 偏导数法与拟合法提出了一种优化拟合法,建立了涡扇发 动机不同状态下的线性化状态变量模型,并结合实际发动 机试车数据对模型的精度进行了仿真验证^[17,18]。将验证后的发动机扩展状态变量模型(7)代入到EKF算法中,并根据 可测量参数的输出偏差 Δy 来估计气路各部件健康参数的 蜕化量 Δh 。EKF 算法具体实现过程如下:

(1) 初始化

$$\Delta \hat{X}_0 = E\left[\Delta X_0\right] \tag{8}$$

$$\boldsymbol{P}_0 = E\left[\left(\Delta \boldsymbol{X}_0 - \Delta \hat{\boldsymbol{X}}_0\right) \left(\Delta \boldsymbol{X}_0 - \Delta \hat{\boldsymbol{X}}_0\right)^{\mathrm{T}}\right]$$
(9)

(2) 状态一步预测

$$\Delta X_{kk-1} = F \Delta X_{k-1} + I \Delta u_{k-1}$$
(10)
(3) 预测误差方差阵

 $P_{k|k-1} = FP_{k-1}F + Q_{k-1}$

(4) 计算滤波增益矩阵

$$K_{k} = P_{k|k-1}G^{\mathrm{T}}(GP_{k|k-1}G^{\mathrm{T}} + R_{k})^{-1}$$
(12)
(5) 状态估计

$$\Delta \hat{X}_{k} = \Delta \hat{X}_{kk-1} + K_{k} (\Delta y_{k} - G \Delta \hat{X}_{kk-1} - H \Delta u_{k})$$
(13)
(6) 估计误差方阵

$$\boldsymbol{P}_{k} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_{k}\boldsymbol{G}) \boldsymbol{P}_{k|k-1}$$
(14)

式中: Q_{k-1} 为系统噪声 w_k 的非负定方差矩阵, R_k 是测量噪声 v_k 的正定方差矩阵。

2 发动机气路在线监控系统设计

为实现对气路故障分析快速实时仿真与算法验证,本 文依据快速原型设计思想设计气路部件的在线监控系统。 该系统主要由发动机模拟器与快速原型控制器两部分构 成。发动机模拟器主要用于替代真实发动机进行实时计 算,模拟发动机气路传感器获得气路关键截面状态参数的 输出。快速原型控制器主要完成发动机气路参数采集、传 输和健康状态实时跟踪、故障分析。

2.1 发动机模拟器

发动机模拟器相当于一台真实发动机,如图3所示。 发动机模拟器嵌入基于Matlab程序开发的发动机非线性模型进行实时计算,模拟发动机转速、温度和压力等传感器信号。通过设定发动机工作状态参数(海拔高度、马赫数及燃油流量等)和发动机气路部件故障模式,自动运行发动机模型程序,将生成的发动机传感器参数(温度、压力、推力及转速等)通过NI cDAQ平台输出给快速原型控制器。模拟器结构主要包括通过 USB接口与运行模型的 PC 连接的 cDAQ-9174 机箱及输出发动机模型数据的 NI 9264 模块。 程序开发采用 NI LabVIEW 2015 图形化开发语言,采用状态机、模块化设计结构来架构整个程序,发动机模型仿真界面如图4所示。

(11)



图3 发动机模拟器 Fig.3 Engine simulator



图4 发动机模型仿真界面 Fig.4 Simulation of the engine model

2.2 快速原型控制器

快速原型控制器包括发动机状态实时跟踪模块和气路 部件故障诊断模块两部分。发动机状态实时跟踪模块将发 动机实时计算获得的数据进行采集、传输与在线跟踪,并能

灵活配置与显示不同截面参数的种类和数量。气路部件故 障诊断模块以气路部件在线故障诊断方法为内核,根据气路 输出参数变化完成气路部件健康参数的实时跟踪与故障判 别。快速原型控制器采用NI cRIO平台架构,如图5所示。 NI cRIO平台洗用 NI cRIO-9066 作为发动机实时控制和状 态分析的处理核心,通过下载在线故障诊断算法来实现发动 机气路健康状态监控与故障分析;选用NI 9205 模块完成发 动机的温度及压力等传感器信号的采集传输;选用NI 9401 模块完成发动机的转速信号的采集传输。发动机状态实时 跟踪和气路部件故障诊断界面如图6和图7所示。图6中发 动机实时运算获得的各截面参数可以数值与波形两种方式 显示,并根据对比需要可将各参数任意组合于左侧的屏幕。 图7中气路部件故障诊断界面主要实现对发动机气路关键部 件健康参数的实时跟踪与故障判别,当健康参数变化超过阈 值时,可通过红灯定位发动机故障部件,且可直接显示健康 参数实时跟踪变化情况。



图 5 快速原型控制器 Fig.5 Fast prototype controller

3 气路部件故障诊断试验验证

在包线范围内选择了多个工作点,利用建立的气路部 件故障诊断系统对涡扇发动机气路部件不同故障模式进行 仿真试验分析与验证。考虑到燃烧室的效率和流量变化的 复杂性,目前常规方法难以实现其准确跟踪,因此,气路部件性能蜕化主要考虑风扇、压气机和涡轮等的性能参数(效率、流量等)的变化情况。

(1) 在高度 *H* = 0km, *Ma* = 0, 低压转子转速 *N*_l =



图6 发动机状态实时跟踪 Fig.6 Tracking of the engine state



图7 气路部件故障诊断 Fig.7 Diagnosis of gas path components

70% $N_{Ldesign}$ 工作状态下,在t = 2s分别植入风扇、压气机、高 低压涡轮突变性故障,各部件健康参数的蜕化量见表2。 η 为效率系数,m为流量系数,fan、hpc、hpt、lpt分别表示风 扇、压气机、高压涡轮和低压涡轮。运用气路部件在线健康 监控系统对各气路部件健康参数进行实时跟踪,得到各部 件效率与流量参数随时间变化情况如图8所示。图8(a)~ 图8(d)分别表示风扇、压气机、高压涡轮和低压涡轮发生突 变性故障的实时跟踪与诊断结果。以压气机为例进行分 析,在t=2s时,压气机发生突变性故障,效率系数和流量系 数分别下降2%与1.6%,从试验结果可以看出,在第220个 采样点,效率系数下降到0.0206,流量系数下降到0.0157, 根据健康参数设定的初始阈值,可判断压气机有可能出现 故障,需对压气机进行维修或更换。对于低压涡轮,由于流 量系数相对于效率系数发生突变性故障时的蜕化量更大, 使得在突变故障发生初始阶段流量系数对发动机气路测量 参数的影响更大,从而导致效率系数蜕化量的跟踪过程先 是跟随流量系数正的变化趋势,然后随着效率系数对气路 测量参数的影响逐渐增大,效率系数逐渐回到本身负的变 化趋势。总体来说,基本实现了对低压涡轮气路部件健康 参数的有效跟踪与故障判断。对于风扇和高压涡轮基本同 样得到了良好的跟踪估计效果。

表2 气路部件故障健康参数蜕化量

Table 2 The value of health parameters for gas path component faults

健康参数/km	蜕化量	健康参数/km	蜕化量
$\eta_{_{\mathrm{fan}}}\!\!=\!\!0$	0.020	$\eta_{ ext{hpt}}=0$	0.02
$m_{\rm fan}=0$	0.025	$m_{\rm hpt}=0$	-0.015
$\eta_{ ext{lpc}}\!=\!\!0$	0.020	$\eta_{\mathrm{lpt}}=0$	0.02
$m_{ m lpc}$ =0	0.016	$m_{lpt}=0$	-0.033

(2) 为进一步验证气路部件在线健康监控系统的有效 性,考虑发动机更多工作状态进行试验分析。分别选用另 外4种工作状态: H = 0km、Ma = 0、 $N_l = 100\% N_{l design}$: H =0 km, Ma = 0.2, $N_l = 90\% N_{l, \text{design}}$; H = 0.5 km, Ma = 0.6, $N_l = 0.6$ 70% $N_{ldesign}$ 和H = 3km、Ma = 0.6、 $N_l = 90$ % $N_{ldesign}$,对发动机 风扇、压气机、高压涡轮与低压涡轮的效率及流量等8个参 数分别发生渐变性蜕化和突变性蜕化的过程进行跟踪。同 时,考虑到发动机不同工作状态下气路部件健康参数将出 现不同蜕化量的情况,本文针对每种状态的气路部件流量 系数和效率系数设定不同的蜕化量进行分析。分别在每个 部件效率系数范围[0~2η₀]和流量系数范围[0~2m₀]内取20 个随机数作为该气路部件健康参数的蜕化量,其中 η_0 和 m_0 分别代表表2中某个部件健康参数的蜕化量。将它们分别 代入到气路部件故障诊断系统中进行仿真分析,气路部件 故障诊断统计结果见表3。每种工作状态下气路部件健康 参数所对应的数值表示对该部件进行20次跟踪试验得到 的故障诊断准确率。从表3中可以看出,对发动机每个气 路部件故障诊断的准确率在90%以上。相对于渐变性故 障,突变性故障诊断的准确率更低,这是由于渐变性故障过 程近似于一个线性变化过程,更符合扩展Kalman滤波算法 的跟踪规律,而突变故障往往表现出较强的非线性,因此, 将导致突变故障诊断准确率更低。在气路部件突变性故障 诊断过程中,风扇流量系数m_{fan}与低压涡轮流量系数m_{bn}故 障监控的准确率相对较低。其原因在于风扇流量系数m_{fan} 与低压涡轮流量系数min设定蜕化量较大,在设定两倍蜕化 量范围内产生的随机蜕化值往往超过发动机线性化模型的 计算范围,从而容易导致故障诊断准确率较低。总体而言, 气路所有部件健康参数跟踪诊断平均准确率达到98.28%,



图8 气路部件健康参数跟踪结果



表3 气路部件健康参数在线跟踪与故障诊断结果

Table 3	The results of health	parameters	monitoring a	and fault	diagnosis	for das	path components

	健康参数	工作状态					
故障类型		$H = 0 \text{km}, Ma = 0$ $N_l = 100\% N_{l.\text{design}}$	$H = 0 \text{km}, Ma = 0.2$ $N_l = 90\% N_{l.\text{design}}$	$\begin{split} H &= 0.5 \mathrm{km}, Ma = 0.6 \\ N_l &= 70\% N_{l.\mathrm{design}} \end{split}$	$\begin{split} H &= 3 \mathrm{km}, Ma = 0.6 \\ N_l &= 90\% N_{l.\mathrm{design}} \end{split}$	准确率/%	
漸变故障	$\eta_{ m fan}$	1	1	1	1	100	
	$m_{\rm fan}$	1	1	1	1	100	
	$\eta_{ m hpc}$	1	1	1	1	100	
	$m_{ m hpc}$	1	1	1	1	100	
	$\eta_{ ext{hpt}}$	1	1	1	1	100	
	$m_{ m hpt}$	0.95	1	1	1	98.75	
	${m \eta}_{ m lpt}$	0.95	0.95	0.95	1	96.25	
	$m_{ m lpt}$	1	1	1	1	100	
突变故障	$\eta_{_{ m fan}}$	1	1	1	1	100	
	$m_{\rm fan}$	0.85	0.9	0.85	0.95	88.75	
	$\eta_{ m hpc}$	1	1	1	1	100	
	$m_{ m hpc}$	1	1	1	1	100	
	$\eta_{ m hpt}$	1	1	1	1	100	
	$m_{ m hpt}$	1	1	1	1	100	
	$oldsymbol{\eta}_{ ext{lpt}}$	1	1	0.95	1	98.75	
	$m_{ m lpt}$	0.9	0.95	0.85	0.9	90	

这说明在发动机不同工作状态下,不同健康参数蜕化情况下,基于快速原型的气路部件在线健康监控系统具有较好的适应性。

4 结束语

为实现航空涡扇发动机包线范围内满足较高精度要求 的气路部件在线健康监控与故障诊断,本文以具有较高精 度要求的非线性模型为基础,融合优化拟合法的线性化模 型与扩展Kalman滤波方法,实现了基于快速原型试验仿真 平台的试验验证,通过仿真分析,试验系统对气路部件故障 诊断准确率达98.28%,能够有效地实现对气路部件健康状 态的有效跟踪与故障分析。因此,该系统的实现可为具有 较高试验要求和苛刻条件的发动机气路性能试验分析提供 一种有效的前期试验方法,也为航空发动机在线监控和故 障诊断算法实时快速验证提供良好的基础试验平台。

⁴AST

参考文献

- Borguet S, Léonard O. A sparse estimation approach to fault isolation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2009, 132(2):1-7.
- [2] 张鹏,黄金泉.航空发动机气路故障诊断的平方根UKF方法研究[J],航空动力学报,2008,23(1):169-173.
 Zhang Peng, Huang Jinquan. SRUKF research on areoengines for gas path component fault diagnostics[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1):169-173. (in Chinese)
- [3] 黄金泉, 冯敏, 鲁峰. 基于自适应粒子滤波的涡扇发动机故障 诊断[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1498-1504.
 Huang Jinquan, Feng Min, Lu Feng. Turbofan engine fault diagnosis based on adaptive particle filtering[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1498-1504. (in Chinese)
- [4] Luppold R H, Roman J R, Gallops G W, et al. Eatimating in fight engine performance variations using Kalman filter concepts[R]. AIAA Paper 1989-2584, 1989.
- [5] 袁春飞,姚华.基于卡尔曼滤波器和遗传算法的航空发动机 性能诊断[J].推进技术,2007,28(1):9-13.

Yuan Chunfei, Yao Hua. Development of Kalman filter and genetic algorithm for aero-engine performance diagnosticls[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(1): 9-13. (in Chinese)

- [6] Dewallef P, Léonard O. On line performance monitoring and engine diagnostic using robust Kalman filtering techniques[R]. ASME Paper GT2003-38379, 2003.
- [7] Julier S J, Uhlmann J K. Reduced sigma point filters for the propagation of means and covariance through nonlinear transformations [C]// Proceedings of the American Control Conferenca, Anchorage, US:IEEE, 2002: 887-892.
- [8] Kobayashi T. Aircraft engine sensor/acutator/componet fault diagnosis using a bank of kalman filters [R]. NASA/CR 2003-212298, 2003.
- [9] Qiu Xiaojie, Huang Jinquan, Lu Feng, et al. Fault diagnosis and isolation of the component and sensor for aircraft engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6):1432-1440.
- [10] Frederik M L, David M V, Koem, et al. Digitally controlled boost PFC converter with improved output voltage controlled[J]. Electrical Engineering, 2007, 89(5): 363-370.
- [11] 鲁峰,黄金泉,孔祥天. 涡扇发动机故障诊断的快速原型设计
 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(2):431-437.
 Lu Feng, Huang Jinquan, Kong Xiangtian. Rapid prototype design for turbofan engine fault diagnosis [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2):431-437. (in Chinese)
- [12] 葛海.大涵道比涡轮风扇发动机建模技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.

Ge Hai. Research on modeling technology for high-bypass ratio turbofan engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

- [13] Lytle J, Follen G, Naiman C, et al. Numerical propulsion system simulation review[R]. NASA/TM-2003-211197, 2003.
- [14] Kobayashi T, Simon D L, Litt J S. Application of a constant gain extended Kalman filter for in-flight estimation of aircraft engine performance parameters[R]. ASME Paper GT2005-68494, 2005.
- [15] Kobayashi T, Simon D L. Application of a bank of Kalman filters for aircraft engine fault diagnostics [R]. ASME GT-2003-38550, 2003.
- [16] Mathioudakis K, Kamboukos P H, Stamatis A. Gas turbine component fault detection from a limited number of measurements[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2004, 218(8): 609-618.

- [17] 胡宇,杨月诚,张世英,等. 基于改进拟合法的涡扇发动机状态变量模型建立方法[J]. 推进技术, 2013(03):405-410.
 Hu Yu, Yang Yuecheng, Zhang Shiying, et al. Establishment of turbofan engine state variable model based on improved fitting method[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013(03):405-410. (in Chinese)
- [18] 胡宇,石陆友,孙振生,等.基于奇异值分解的涡扇发动机线
 性状态模型能观度分析[J]. 航空科学与技术, 2018,29(2):
 73-78.

Hu Yu, Shi Luyou, Sun Zhensheng, et al. Observable degree analysis about linear state model of turbofan engine based on singular value decomposition[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018,29(2): 73-78.(in Chinese) (责任编辑 王昕)

作者简介

胡宇(1984-) 男,博士,讲师。主要研究方向:航空发动 机建模、故障诊断理论与方法研究。 Tel: 15289360632 E-mail:huyu1222@163.com

Research on Online Health Monitoring System for Gas Path Components of Turbofan Engine Based on Rapid Prototyping

Hu Yu*, Li Kui, Zhang Yin, Sun Zhensheng, Jin Guofeng Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China

Abstract: In order to achieve real-time simulation with high accuracy in the whole envelope of turbofan engine, an online health monitoring system based on rapid prototyping technology and turbofan engine nonlinear model was proposed for gas path components of turbofan engine. In this attribution, the nonlinear model of turbofan engine was calculated in real-time as a replacement of the real engine, and the linear model of the engine obtaining through the optimization fitting algorithm was exploited to the extended Kalman filter to track the health parameters of gas path components online. Then, online fault diagnosis method was testified through the fault diagnosis prototype system based on CompactDAQ and CompactRIO platform. The simulation results showed that the online health monitoring system based on rapid prototyping technology and turbofan engine nonlinear model has the ability of diagnosing the faults of the gas path components, and the average accuracy is up to 98.28%.

Key Words: turbofan engine; fault diagnosis; rapid prototyping; real-time tracking; gas path components

Received: 2019-04-08; Revised: 2019-04-18; Accepted: 2019-04-25

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (201605U8002); Xi' an Scientific and Technological Program (201805048YD26CG32-2); Sichuan Scientific and Technological Program(19ZDZX0037)

*Corresponding author.Tel.: 15289360632 E-mail: huyu1222@163.com