

文章编号: 1000-8055(2008)01-0169-05

航空发动机气路故障诊断的 平方根 UKF 方法研究

张 鹏, 黄金泉

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 设计了适用于双轴涡扇发动机健康参数估计的平方根 UKF 滤波算法, 解决了线性卡尔曼滤波器估计结果准确性依赖于线性模型精度; 常规 UKF 算法中由于计算误差及噪声信号影响引起误差协方差矩阵负定而导致滤波结果发散等问题. 提出了根据测量残差变化改进滤波收敛速度与稳定性的方法. 发动机渐变与突变故障模式下仿真结果表明, 平方根 UKF 估计算法收敛速度快, 稳定性强, 精度高, 是一种有效的发动机气路部件健康参数估计与故障诊断方法.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 故障诊断; 非线性滤波; 平方根 UKF

中图分类号: V233. 7

文献标识码: A

SRUKF research on aeroengines for gas path component fault diagnostics

ZHANG Peng, HUANG Jin-quan

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: An algorithm based on square root unscented Kalman filter (SRUKF) was presented to solve the aeroengine health parameter estimation problem. The SRUKF method could be applied to addresses the estimation inaccuracy of linear Kalman filter and the filtering divergence problem caused by error covariance matrix non-positive in general unscented Kalman filter. A method for improving the filtering convergence rate and stability was developed according to the residual vector. The results obtained from gradual and abrupt fault diagnostic simulation show that, SRUKF features rapid convergence, higher stability and accuracy, making it become an efficient estimation and fault diagnosis method for health parameters of gas path components in aeroengines.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengine; fault diagnostics;
nonlinear filtering; square root unscented Kalman filter (SRUKF)

航空发动机气路部件工作条件复杂恶劣, 属于故障多发部件. 及时准确的评估部件健康状况, 是实现发动机故障预测、诊断, 降低维护费用, 提高飞行可靠性和安全性的重要途径. 卡尔曼滤波器在上世纪 80 年代被引入到发动机故障诊断中, 经过对算法的不断改进, 已经被广泛的应用于解

决发动机传感器与气路部件的故障诊断问题^[1-3]. 线性卡尔曼滤波器设计依赖于系统的线性化模型, 线性模型的准确程度直接影响滤波结果精度. UKF(Unscented Kalman filter) 通过构造一组确定的加权样本点对待估计参数进行逼近, 避免了对非线性对象的线性化建模以及 Jacobian 矩阵

收稿日期: 2006-12-21; 修订日期: 2007-03-12

作者简介: 张鹏(1979-), 男, 山东青岛人, 博士生, 主要从事航空发动机控制与故障诊断方面的研究.

的计算,是一种可直接应用于非线性系统状态估计的卡尔曼滤波算法^[4].相比于 EKF (Extended Kalman filter),UKF 在不增加计算量的前提下,估计精度和收敛速度显著提高^[5].平方根 UKF 算法以估计误差的平方根矩阵进行迭代计算,解决了常规 UKF 算法中由于计算误差和噪声信号等因素引起误差协方差矩阵负定而导致的滤波结果发散的问题,提高了滤波的精度和稳定性^[6].本文采用平方根 UKF 滤波算法,设计了发动机部件健康参数估计滤波器,根据测量残差序列的变化,提出了改善滤波收敛速度与稳定性的方法,发动机气路部件典型渐变故障和突变故障诊断仿真结果验证了算法的有效性.

1 问题的提出

某型双轴涡扇发动机非线性数学模型为

$$\begin{aligned} h_{k+1} &= h_k + \omega_k \\ y_k &= H(x_k, h_k, u_k) + v_k \end{aligned} \quad (1)$$

其中,控制量 $u = [w_f, A_8]^T$ 为发动机主燃油量和尾喷口面积; x 为发动机状态向量,如进口气体温度、压力等; $h = [\eta_{fan}, \eta_{cpr}, \eta_{hpt}, \eta_{lpt}, m_{fan}, m_{hpt}, m_{lpt}]^T$ 为主要气路部件健康参数,包括效率系数 η 和流量系数 m (下标 fan, cpr, hpt, lpt 依次表示风扇、压气机、高、低压涡轮),其数值反映出部件健康状况;输出 $y = [N_1, N_h, p_{13}, T_{13}, p_{22}, T_{22}, p_3, T_3, p_{41}, T_{41}, p_7, T_7]^T$ 为高、低压转子转速,外涵道、压气机、燃烧室、低压涡轮和加力燃烧室进口压力和温度的传感器测量值; ω_k, v_k 为互不相关白噪声信号, $E[\omega\omega^T] = N, E[vv^T] = R; H(\cdot)$ 为表示发动机工作过程的非线性函数.发动机运行过程中部件的老化,外物吸入损伤和局部温度过高等因素都可能导致发动机气路部件性能的下降甚至故障的发生,这种性能下降或者故障表现为健康参数的缓慢或者突然变化.设计基于平方根 UKF

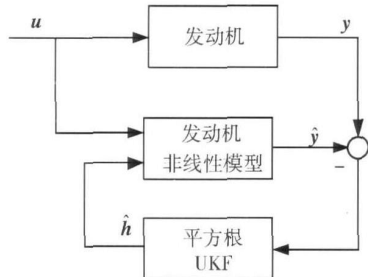


图 1 基于平方根 UKF 的发动机气路部件故障诊断系统

Fig. 1 Aeroengine gas path component diagnostics system

的发动机故障诊断系统(图 1),平方根 UKF 滤波器根据蜕化或故障发动机与发动机非线性模型的输出残差,实时估计发动机部件健康参数,使非线性模型输出跟踪故障发动机的输出,从而达到故障诊断与评估的目的.

2 平方根 UKF 滤波算法

在输入指令与进口条件确定的情况下,部件健康参数是影响发动机输出的主要因素,因此,发动机气路部件故障诊断问题可以转化为部件健康参数的非线性辨识估计问题.设计健康参数平方根 UKF 滤波估计算法如下:

(1) 健康参数 h_0 与误差协方差平方根矩阵 $S_{h,0}$ 初始化

$$\begin{aligned} h_0 &= E[h] \\ S_{h,0} &= chol\{E[(h - h_0)(h - h_0)^T]\} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 时间更新,计算采样点

$$\begin{aligned} \hat{h}_k &= \hat{h}_{k-1} \\ S_{h,k} &= S_{h,k-1} + chol\{N\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\chi_k = \{\hat{h}_k, \hat{h}_k + \sqrt{(n + \lambda)} S_{h,k} \hat{h}_k - \sqrt{(n + \lambda)} S_{h,k}\} \quad (4)$$

$$y_k = H[x_k, \chi_k, u_k], \hat{y}_k = \sum_{i=1}^{2n} W_i^m y_{i,k} \quad (5)$$

(3) 测量更新

$$S_{y,k} = qr\left\{\begin{bmatrix} \sqrt{W_1^c} \cdot (y_{2n,k} - \hat{y}_k) \\ \sqrt{R} \end{bmatrix}\right\} \quad (6)$$

$$S_{y,k} = cholupdate\{S_{y,k},$$

$$\sqrt{|W_0^c|} \cdot [y_{0,k} - \hat{y}_k], \text{sgn}(W_0^c)\} \quad (7)$$

$$P_{hy,k} = \sum_{i=1}^{2n} W_i^c [\chi_{i,k} - \hat{h}_k][y_{i,k} - \hat{y}_k]^T \quad (8)$$

$$K_k = P_{hy,k} (S_{h,k}^T S_{h,k})^{-1} \quad (9)$$

$$\hat{h}_k = \hat{h}_k + K_k (y_k - \hat{y}_k) \quad (10)$$

$$U = K_k S_{y,k} \quad (11)$$

$$S_{h,k} = cholupdate\{S_{h,k}, U, \cdot\} \quad (12)$$

其中 n 为估计参数的维数(本文中 $n = 8$); λ, W_i^m, W_i^c 分别为滤波尺度系数,均值,协方差矩阵的加权因子,可参考一般 UKF 中方法进行计算. $chol(\cdot), qr(\cdot), cholupdate(\cdot)$ 分别为矩阵 cholesky 分解, qr 分解以及 cholesky 一阶更新算法^[6].

3 提高滤波收敛速度与稳定性的方法

N, R 分别为系统噪声和测量噪声方差阵,其数值的选择直接影响滤波器性能. R 阵可参照传感器特性计算得到, N 阵一般只能根据经验确定,

N 阵增大,滤波器收敛速度快,但过大的 N 阵容易导致滤波器发生振荡,估计精度下降.经反复试验,在部件健康参数不变,滤波稳定收敛的情况下,取 $N = 4 \times 10^{-4} \cdot I_{n \times n}$, $R = 4 \times 10^{-6} \cdot I_{m \times m}$ (m 为输出变量的维数),平方根 UKF 算法估计结果较为理想.然而在发生部件故障情况下,如果仍使用上述的 N, R 矩阵进行计算,滤波器收敛速度十分缓慢.本文根据滤波器不同工作阶段测量残差的变化,适度增大或减小 N 阵,仿真结果表明,此方法提高了滤波器的收敛速度,同时保证了估计结果的精度.

系统测量残差 $e_k = y_k - \hat{y}_k$, 可以看作是 y_k 和 $\hat{y}_k$ 的线性组合.容易得到,在滤波结果趋于稳定时, $e_k \sim N(0, \sigma_k^2)$, 其中

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^{2n} W_i^c [Y_{i,k} - \hat{y}_k]^T + R \quad (13)$$

依据测量残差构造变量 $r_k = e_k^T (\sigma_k^2)^{-1} e_k$, 则 r_k 服从自由度为 m 的 χ^2 分布, $r_k \sim \chi^2(m)$. 因此可以通过设定阈值 ε , 根据 r_k 是否超出阈值 ε 对当前时刻滤波器的工作状态进行划分.在滤波初始阶段,适当增大 N 阵加快收敛速度;滤波接近稳定收敛时减小 N 阵避免振荡.参考数理统计中假设检验问题的解决方法,取显著水平 $\alpha = 0.10$, 查 χ^2 分布表,设定阈值 $\varepsilon = 18.549$, 按照如下规则对 N 阵进行调整

$$N = \begin{cases} \theta \cdot N_c, & r_k \geq \varepsilon \\ N_c, & r_k < \varepsilon \end{cases} \quad (14)$$

式中 $N_c = 4 \times 10^{-4} \cdot I_{n \times n}$ 为无故障滤波稳定时的系统噪声方差阵,调整因子 θ 可根据仿真结果确定,本文中对多种故障情况下反复试验,取 $\theta = 4$.

4 数字仿真与结果分析

以双轴涡扇发动机的部件级模型为对象,进行了发动机气路部件渐变和突变故障诊断的仿真.以非线性模型模拟发动机对象,并通过改变模型中相应参数来模拟各种故障模式;发动机非线性模型为按照其标称特性设计的实时数学模型^[7],所有输入输出参数均依据相似理论换算到标准地面状态下,并进行无量纲归一化处理.

4.1 渐变故障诊断仿真

发动机在运行过程中由于机械磨损等原因不可避免发生部件性能蜕化,性能蜕化发生缓慢,但其长期累积效应对于发动机影响不可忽略.对发

动机部件健康状况进行有效监控,作出其健康状况当前状态以及发展趋势的有价值的判断结果,是实现“视情维修”维护方法的关键.由于部件蜕化等原因引起的渐变故障变化缓慢,因此可以认为在一次飞行过程中,部件的性能蜕化程度保持不变.图 2 为发动机风扇与压气机发生效率下降 3.5% 和 3%,流量下降 3% 的故障诊断结果;图 3 为高、低压涡轮效率下降 3%,流量下降 3% 的故障诊断结果.可见,对于渐变的部件故障,平方根 UKF 方法保证了较高的收敛速度和诊断精度,能够为发动机故障预测、诊断提供有效信息.

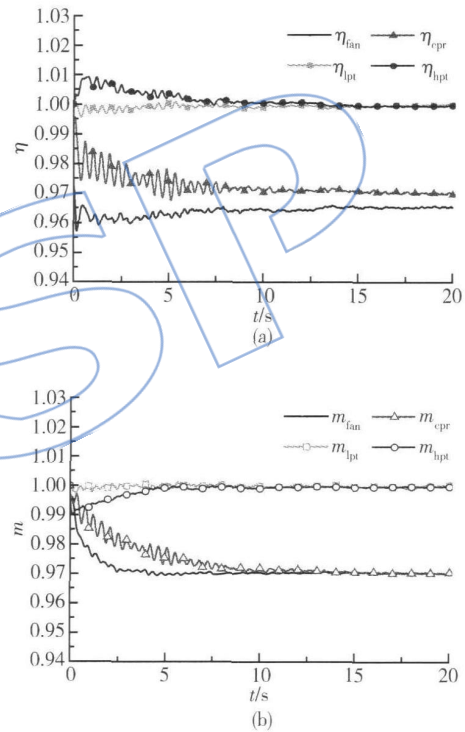


图 2 风扇与压气机渐变故障诊断结果

Fig. 2 Fan and compressor gradual fault diagnostics result

4.2 突发性故障诊断仿真

长期疲劳累积效应或者外物吸入造成发动机风扇与压气机转子叶片断裂损伤是一种比较常见的故障,此外,由于局部温度过高导致涡轮导向器或转子叶片烧蚀变形的情况也偶有发生.这两者都会导致相应部件性能短时间内发生较大的变化,从而导致发动机整体性能的下降.本文针对以上两种突发性故障进行了故障诊断的仿真,图 4 为风扇、压气机效率与流量突发下降 3% 的故障诊断结果;图 5 为高、低压涡轮部件效率和流量突

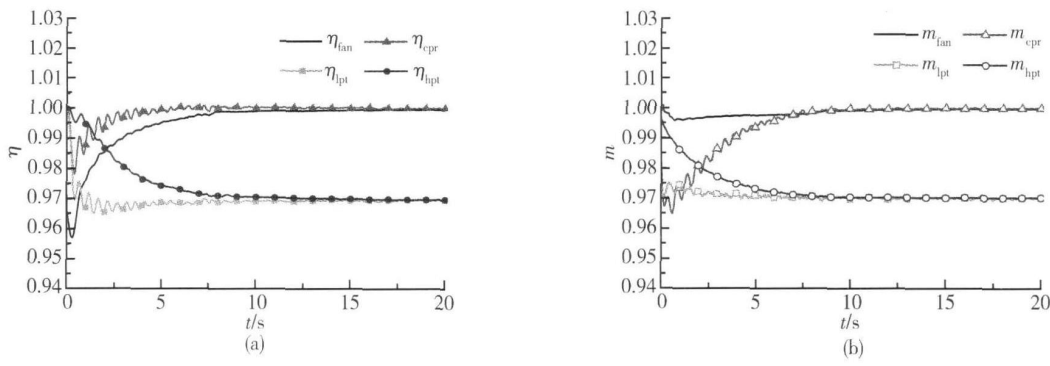


图 3 高、低压涡轮渐变故障诊断结果

Fig. 3 High and low pressure turbine gradual fault diagnostics result

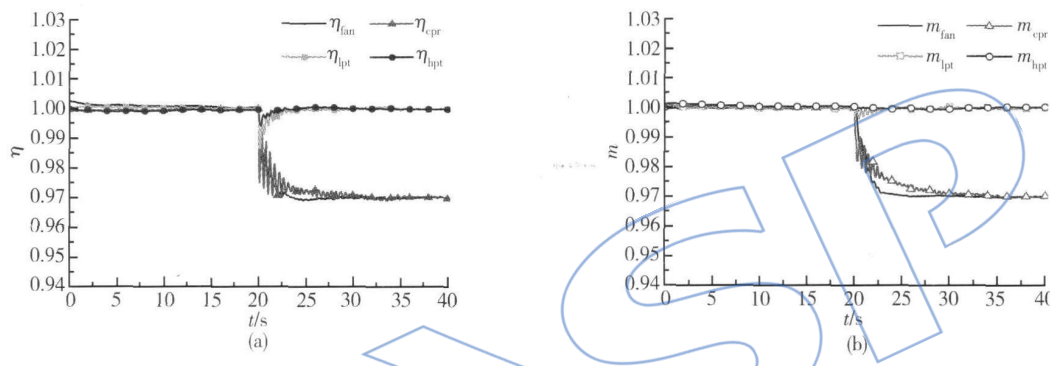


图 4 风扇与压气机突变故障诊断结果

Fig. 4 Fan and compressor abrupt fault diagnostics result

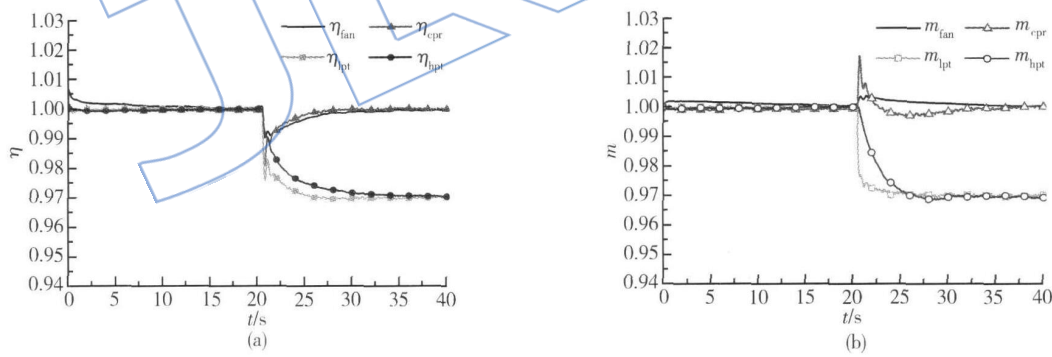


图 5 高、低压涡轮突变故障诊断结果

Fig. 5 High and low pressure turbine abrupt fault diagnostics result

然下降 3 % 的故障诊断结果. 仿真结果表明, 对于突发性故障, 平方根 UKF 滤波器依然保证了较高诊断精度.

5 结 论

UKF 算法解决了线性卡尔曼滤波器设计依赖对象线性模型, 由于线性模型精度低导致滤波结果不准确的问题. 平方根 UKF 算法对常规 UKF 算法进行了进一步的改进, 以估计误差的平

方根代替协方差矩阵进行迭代运算, 在保证计算精度的前提下, 大大提高了滤波的稳定性. 本文针对航空发动机健康参数估计问题, 设计了平方根 UKF 算法, 提出了改善滤波收敛速度与稳定性的方法, 通过对发动机健康参数的非线性估计, 实现发动机气路部件渐变故障和突变故障诊断. 仿真结果表明, 该方法收敛快, 稳定性强, 精度高, 是一种有效的航空发动机渐变故障和突变故障的健康参数估计方法.

参考文献:

- [1] 李松林,孙健国,黄金泉,等. 涡扇发动机机载自适应建模技术研究[J]. 航空动力学报,1997,13(3):315-318.
LI Songlin, SUN Jianguo, HUANG Jinquan, et al. An in-flight adaptive model of turbofan[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 13 (3): 315-318.
- [2] Simon D, Simon D L. Aircraft turbofan engine health estimation using constrained Kalman filtering [R]. NASA/TM-2003-212528.
- [3] Takahisa K, Simon D L. Application of a bank of kalman filters for aircraft engine fault diagnostics [R]. NASA/TM-2003-212526.
- [4] Julier S, Uhlmann J K. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Trans A C, 2000, 45 (3): 477-482.
- [5] Wan E A. The unscented Kalman filter for nonlinear estimation[C] //IEEE Proceedings of Adaptive Systems for Signal Processing Communications and Control Symposium, Lake Louise, Alberta, Canada: [s. n.], 2000: 153-158.
- [6] Van Der Merwe R, Wan E A. The square-root unscented Kalman filter for state and parameter estimation [C] //IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing- Proceedings, New York: [s. n.], 2001: 3461-3464.
- [7] 窦建平, 黄金泉, 周文祥. 基于 UML 的航空发动机仿真建模研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 684-688.
DOU Jianping, HUANG Jinquan, ZHOU Wenxiang. Research of aeroengine modeling based on UML [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 684-688.