

文章编号: 1000-8055(2008)02-0396-05

航空发动机控制系统传感器 FDIA 系统仿真

陈 毅, 黄金泉, 张 鹏

(南京航空航天大学 能源与动力学院 南京 210016)

摘 要: 基于卡尔曼滤波器组, 建立了航空发动机控制系统传感器故障诊断系统, 实现了对单个传感器故障的检测、隔离与重构(FDIA), 确保了发动机控制系统即使在传感器故障发生的情况下, 依然能安全可靠地工作. 同时利用 Simulink 建立一个通用的发动机传感器故障诊断仿真平台, 在此仿真平台上, 对故障的诊断进行仿真验证, 并分析了测量噪声对故障诊断系统性能的影响, 为发动机在线传感器故障诊断系统的实现提供理论依据.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 卡尔曼滤波器组; 传感器故障诊断; 数据重构; 仿真平台

中图分类号: V233 7

文献标识码: A

FDIA simulation of aero engine control system sensor FDIA system

CHEN Yi, HUANG Jir-quan, ZHANG Peng

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on a bank of Kalman filters, an aircraft engine sensor fault diagnostics system was developed, thus enabling fault detection, isolation and accommodation (FDIA) of individual sensor faults and safe operation of engine control system even in the case of sensor failure. A universal graphical simulation platform for aircraft engine sensor fault diagnostics was designed using Simulink software. Simulations were performed on the platform to verify the feasibility of the sensor fault diagnostics system. The sensor noise impact on the performance of sensor fault diagnostics system was also analyzed, offering valuable reference for on-line aircraft sensor fault diagnostics.

Key words: aerospace propulsion system; a bank of Kalman filters; sensor fault diagnostics; data accommodation; simulation platform

发动机控制系统由早期的机械液压式控制系统发展到现在的全权限数字电子控制(FADEC)系统, 一方面使发动机性能有了很大的提高, 另一方面也对发动机控制系统的可靠性提出了更高的要求. 控制系统的所需信息来自分布在发动机各部位的传感器, 因此能及时可靠地将故障传感器检测并隔离出来, 并重构出相应的传感器数据, 是发动机控制系统可靠工作的保证. 国外早在 70 年代就开

始传感器故障诊断的研究, 80 年代中期开始, 美国 NASA Lewis 研究中心的 ADIA(Advanced DIA)计划全面总结了当时的各种适用于航空发动机的传感器故障检测、隔离、重构的算法, 并在 F100 等发动机上得到成功验证^[1]. 20 世纪 90 年代初, 美国国防部和美国国家航空航天局联合推动实施了综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET, Integrated high performance turbine engine technology)计划, 该计

收稿日期: 2007-01-29; 修订日期: 2007-04-29

作者简介: 陈毅(1982), 男, 福建龙岩人, 硕士, 研究方向为发动机状态监视与故障诊断.

划提出了建立健全的航空发动机性能监视与故障诊断系统^[2]。

近几年来,随着发动机状态监视与故障诊断技术的发展,发动机健康管理系统(EHM)这一全新的概念被提了出来^[3]。由此可见,发动机传感器故障诊断一直是发动机可靠工作的研究重点,同时,故障诊断的研究也朝着实时化、综合化的方向发展。卡尔曼滤波器不仅可以利用可测参数去估计不可测参数,如:发动机部件的性能参数,同时还适于用计算机实时处理,因此受到了国内外广大学者的广泛关注^[4]。本文利用卡尔曼滤波器组建立发动机传感器故障诊断系统,并在自行设计的通用仿真平台上做了大量仿真研究。

1 发动机传感器 FDIA 系统的构造

发动机传感器 FDIA(Fault detection, isolation and accommodation)系统主要由SVM 模块、测量值输入和控制命令输入模块、卡尔曼滤波器组模块、故障检测和隔离机制模块以及故障传感器重构模块组成。由发动机的真实工作状态量,选择相对应的线性模型(SVM),根据线性模型的 A, B, C, D 矩阵设计出相应的卡尔曼滤波器组,同时将发动机控制向量和传感器测量值作为卡尔曼滤波器组的输入,由卡尔曼滤波器组获得相应传感器的测量估计值以及故障指示信号(WSSR),通过对 WSSR 的分析,由故障隔离机制做出故障检测和隔离判断。若传感器没有发生故障时,传感器的测量值直接被送入发动机控制系统,发动机继续安全可靠地运行。当某个传感器发生故障时,故障隔离机制将诊断结果告知故障传感器数据重构模块,激活相应的故障传感器测量值重构功能,重构出合理的数据,由重构出的数据代替故障传感器测量值,输入到发动机控制系统中,使得发动机控制系统依然能安全可靠地工作。整个传感器故障 FDIA 系统如图 1 所示。

对于传感器故障诊断,设计 m 个卡尔曼滤波器, m 为被检测的传感器数目。第 i 个卡尔曼滤波器监测第 i 个传感器,以除去被监测的传感器测量值 y^i 后剩余的 $m-1$ 个测量值子集 y^i 作为输入量,得到状态估计值 $\hat{x}^i$ 以及滤波残差 $e^i = y^i - \hat{y}^i$ 。第 i 个卡尔曼滤波器的方程为

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}^i &= A\hat{x}^i + Bu + K^i(y^i - \hat{y}^i) \\ \hat{y}^i &= C^i\hat{x}^i + D^iu\end{aligned}$$

式中, $\hat{x}^i$ 是状态向量估计值,矩阵 C^i 和 D^i 分别是 C 和 D 中除去第 i 行后剩下的子集, $\hat{y}^i$ 是输出的估计值, K^i 是对应于矩阵对 (A, C) 的卡尔曼滤波器增益矩阵。

当某一个发动机传感器发生故障时,所得测量值与估计值必然不能相吻合,滤波残差也将发生改变,因此这些滤波残差包含着传感器故障的信息。采用滤波残差加权二乘方 $e^T(\Sigma^i)^{-1}e^i$ 对滤波残差进行归一化处理,并命名为故障指示信号 $WSSR_i$,其中 $\Sigma^i = \text{diag}[\sigma_1^2, \dots, \sigma_{i-1}^2, \sigma_{i+1}^2, \dots, \sigma_m^2]$, σ_j 表示第 j 个传感器的标准偏差。

对于单个故障传感器的隔离,由于每个卡尔曼滤波器用到的只是除去被检测传感器后剩余的传感器测量值,当某个传感器发生故障时,检测该传感器的卡尔曼滤波器只用到无故障的传感器测量值子集,因此其故障指示信号 $WSSR_i$ 依然保持得较小,而其余卡尔曼滤波器却用到了包含该故障传感器测量值的测量值子集,因此这些故障指示信号 $WSSR_i$ 会因此增大并最终超出门限值,从而将故障传感器检测隔离出来^[4,5]。

由于卡尔曼滤波器可以根据传感器测量值去估计发动机的状态向量,当第 i 个传感器发生故障时,第 i 个卡尔曼滤波器由于没有用到故障传感器测量值,因此依然能准确地估计出发动机的状态向量,再由量测方程可以获得相应的故障传感器测量值重构数据。

2 通用仿真平台设计

为了达到通用仿真平台的设计目的,除了利用 Simulink 已有的模块,还需要构建一个自行设计的模块库。本文根据图 1 所示的框架,采用通用设计思想,设计了相应功能的模块,并保存在模块库中,该模块库主要包含:发动机 SVM 查找模块、测量值输入和控制命令输入模块、卡尔曼滤波器模块、故障发生模拟模块、故障指示信号生成处理模块、故障检测和隔离机制模块、仿真结果显示

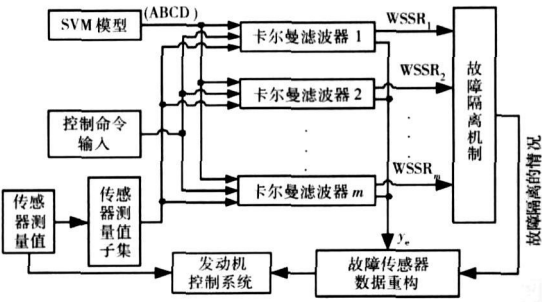


图 1 发动机传感器 FDIA 系统

Fig.1 Aircraft engine sensor FDIA system

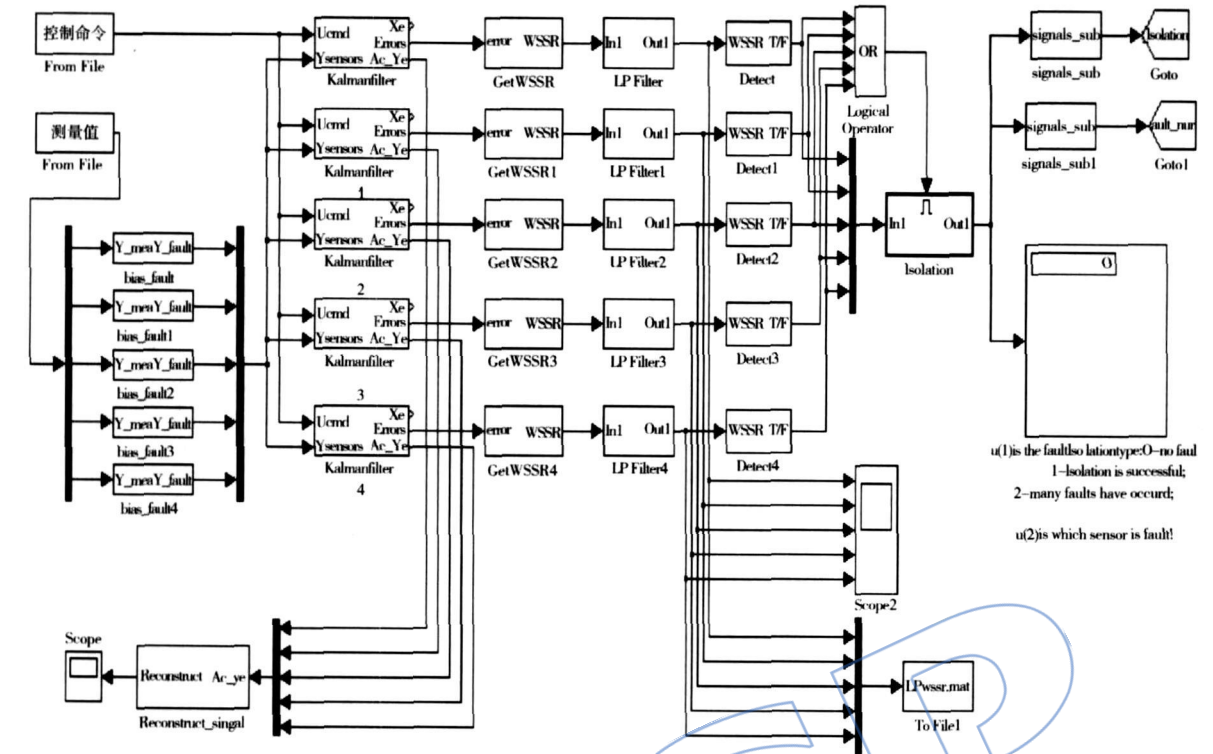


图 2 某发动机传感器 FDIA 系统仿真平台

Fig. 2 Simulation platform for aircraft engine sensor FDIA system

模块、数据输出存储模块、故障传感器重构模块等几大模块。

从模块库中拖曳所需模块以及设置合理参数,可以得到各种类型发动机传感器 FDIA 系统的仿真平台. 本文假设某型发动机有 5 个传感器需要被监测, 整个 FDIA 系统仿真平台如图 2 所示。

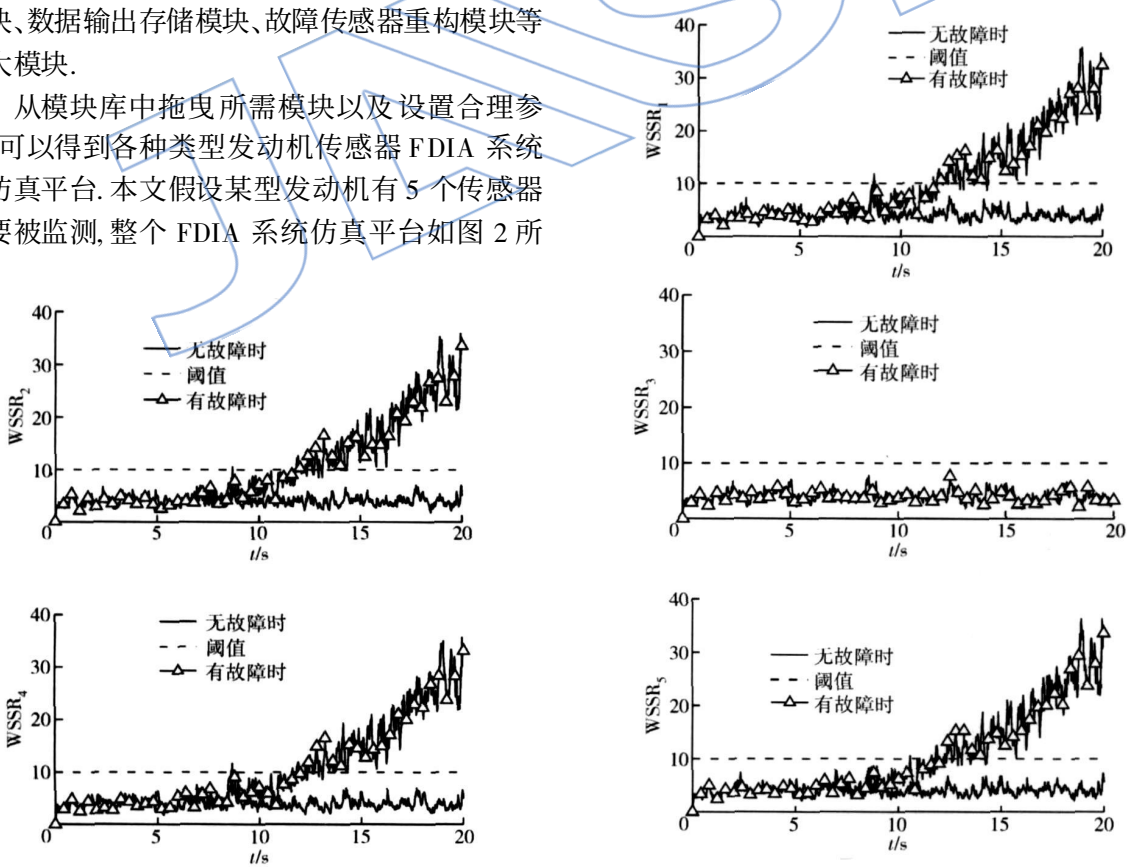


图 3 燃烧室出口压力(p_4)传感器发生渐变型故障时对应的故障指示信号

Fig. 3 Fault indicator signals when p_4 sensor gradual fault

3 单个传感器故障诊断仿真

选取能较全面地反映发动机的气动和热力工作状况的风扇转速 N_L 、压气机转速 N_H 为状态变量,控制命令为供油量 WFB ,以风扇转速、 N_L 压气机转速 N_H 、燃烧室出口压力 p_4 、低压涡轮进口温度 T_{45} 、低压涡轮出口压力 p_6 作为发动机要监测的测量参数^[6].以某发动机非线性模型的仿真数据作为发动机真实测量数据,并根据实际情况,加入合适的测量噪声($\sigma = 0.002$),在图 2 所示的仿真平台上进行了仿真验证.限于篇幅,本文只列出对燃烧室出口压力传感器渐变型故障诊断的仿真结果.对 p_4 传感器测量值进行归一化 $pp_4 = p_4 / (p_4)_s$,在 5 s 处, p_4 传感器发生渐变型故障,故障的数学表达式为 $y_i = y_i + 0.0008(t - 5)$,对应的故障指示信号与数据重构如图 3、4 所示.

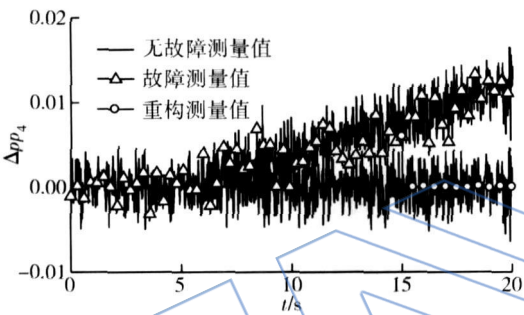
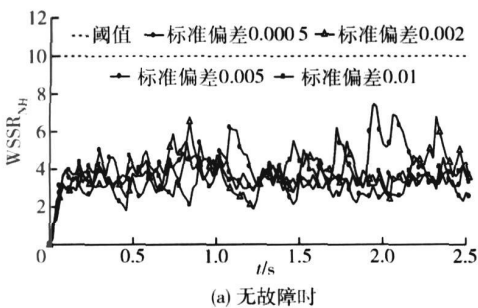


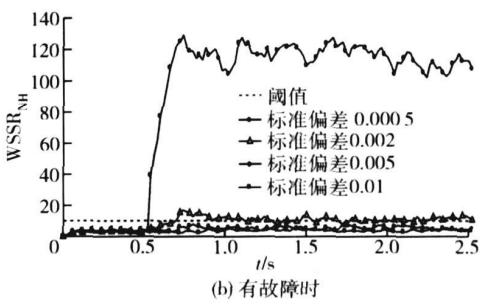
图 4 燃烧室出口压力(p_4)传感器渐变型故障数据重构

Fig. 4 p_4 sensor gradual fault Accommodation

由图 3 可见,只有 p_4 传感器对应的故障指示信号($WSSR_3$)在故障发生时,依然保持较小时,而其他故障指示信号都逐渐增大,并在 15 s 附近超出了检测阈值,这样,故障隔离机制就检测并隔离故障的发生源为 p_4 传感器.故障隔离机制将诊断结论发送到数据重构模块,图 4 中 $\Delta p p_4$ 为归



(a) 无故障时



(b) 有故障时

图 5 不同测量噪声大小对传感器 FDIA 系统的影响

Fig. 5 Sensor noise impact on the performance of sensor FDIA system

一化后的 p_4 测量值增量,可以看出,重构模块不仅能重构出发动机真实数据,还能滤除测量噪声.

4 测量噪声对传感器 FDIA 系统性能影响分析

不同的发动机,安装着不同的传感器,每个传感器都有自己的测量精度,同时,发动机的运行环境也不同,而这些差别可以表现为测量噪声的大小不同.针对这个问题,本文设置了不同大小的测量噪声,并比较在无故障发生和发生故障(N_L 传感器故障大小为 0.6%)两种情况下,传感器 FDIA 系统性能有何变化.由于 N_L 传感器故障对其他故障指示信号的影响是相同的,因此只选取高压转速传感器故障指示信号 $WSSR_{NH}$ 作为观察对象,仿真结果如图 5 所示.

由图 5 可以看出,在无故障发生时,噪声大小对故障指示信号的影响不大,因此检测阈值的选取与噪声大小无关.当故障发生时,噪声越小,故障指示信号变化越明显,即传感器 FDIA 系统对故障更加敏感.为了研究噪声大小对发动机传感器 FDI 系统能隔离的最小故障(FaultMin)幅值大小的影响,下面将分别在测量噪声标准偏差 σ 为 0.0005, 0.002, 0.005, 0.01 情况下设置 2σ , 3σ , 4σ 不同大小的 N_L 传感器阶跃故障,仿真结果如图 6 所示.

由图 6 可以看出,当检测阈值确定后,传感器 FDIA 系统能隔离的最小故障(FaultMin)为测量噪声标准偏差的倍数(在本文设定的检测阈值下为 3σ).一旦故障幅值大于 FaultMin,就能及时地被检测并隔离出来.同时测量噪声越小,发动机传感器 FDIA 系统能隔离的最小故障(FaultMin)也越小,即对微小故障也能够及时可靠地检测并隔离出来.

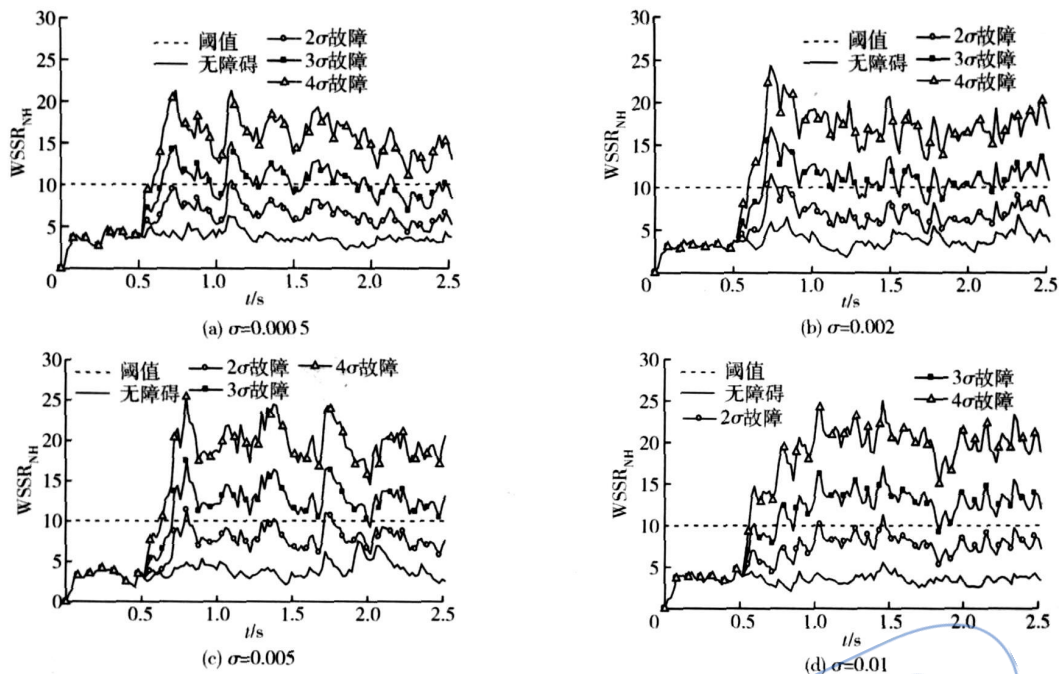


图 6 不同噪声下对传感器故障的检测隔离

Fig. 6 Ensor fault diagnostics under difference sensor noise

5 结 论

本文利用卡尔曼滤波器组设计了传感器 FDIA 系统, 在 Simulink 软件上设计了发动机传感器故障诊断通用图形仿真平台, 该仿真平台具有一定的通用性, 能适用于不同类型的发动机, 实现了图形化的操作方式. 仿真结果表明, 所建立的传感器故障诊断系统, 不仅能对单个传感器故障进行检测和隔离, 还能重构出故障传感器的测量值.

对不同测量噪声下的故障诊断分析可以看出, 测量噪声对传感器 FDIA 系统性能影响很大, 测量噪声越小, 传感器 FDIA 系统能检测隔离出的传感器故障就越小, 即传感器 FDIA 系统性能越好.

参考文献:

[1] Delaat J C, Merrill W C. Advanced detection isolation and accommodation of sensor failures in turbofan engine, reat

time microcomputer implementation [R]. NASA- 2925, 1990.

[2] 方昌德. 发动机状态监视和故障诊断系统的发展[J]. 国际航空, 2005, 6: 66-68.

FANG Changde. Condition monitoring and fault diagnostic system of engine[J]. International Aviation, 2005, 6: 66-68.

[3] Sanjay G. Controls and health management technologies for intelligent aerospace propulsion systems [R]. AIAA-2004-0949.

[4] Takahisa K. Aircraft engine sensor/actuator/component fault diagnosis using a bank of kalman filters[R]. NASA/CR-2003-212298.

[5] Takahisa K, Donald L S. Application of a bank of kalman filters for aircraft engine fault diagnostics [R]. NASA/TM-2003-212526.

[6] 李松林, 孙健国, 李健民, 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, LI Jianmin, et al. An air flight adaptive model of turbofan[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 13(3): 315-318.