

文章编号: 1000-8055(2004)01-0164-05

某型涡扇发动机控制系统传感器故障诊断研究

许秀玲, 郭迎清, 王镛根, 缙林峰

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 研究利用卡尔曼滤波器及多重故障假设检验方法来检测某发动机控制系统传感器硬、软故障, 并实现故障传感器的输出重构。给出了传感器故障诊断原理及算法, 针对传感器常见典型故障进行了故障诊断过程仿真。仿真结果表明, 所研究的方法能及时、有效的检测到故障传感器, 并对其进行隔离和重构, 没有发生误报和漏报现象。

关键词: 航空、航天推进系统; 涡扇发动机; 传感器故障诊断; 卡尔曼滤波器; 多重故障假设检验

中图分类号: 233.7

文献标识码: A

Sensor Failure Diagnosis for Turbofan Engine Control System

XU Xiu-ling, GUO Ying-qing, WANG Yong-gen, GOU Lin-feng

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to Kalman filter and multiple-failure-hypothesis based testing, the sensor failures are detected, isolated and accommodated in turbofan engine control system. Principles and algorithms of sensor failure detection, isolation and accommodation are given. Sensor failure diagnosis process for some typical sensor failures is simulated. Simulation results illustrate that this method can immediately and effectively detect, isolate and accommodate sensor failures, no mistake and failure reports were found.

Key words: aerospace propulsion system; turbofan engine; sensor failure diagnose;

Kalman filter; multiple-failure-hypothesis based testing

现代先进航空发动机都具有状态监视和故障诊断系统, 并且有与数控综合一体化的发展趋势。国外从 80 年代中期开始, 围绕传感器故障的检测、隔离和重构 (Detection, Isolation and Accommodation of Sensor Failures, 简称 DIA) 开展了一系列的研究。其中较成功的有 NASA Lewis 研究中心的 ADIA (Advanced DIA) 计划, 该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, 并在此基础上完成

了整个计划, 其性能优异, 满足实时性要求。该计划已在 F100 等发动机上得到成功验证^[1,2]。

本文针对国内新研制的某型涡扇发动机控制系统中用到的高、低压转子转速, 高压压气机出口压力、低压涡轮出口温度等 4 个传感器, 研究利用卡尔曼滤波法并结合多重故障假设检验方法对这些传感器的硬、软故障进行检测、隔离, 并对传感器输出进行重构。

收稿日期: 2003-04-04; 修订日期: 2003-10-10

作者简介: 许秀玲(1976-), 女, 山东菏泽人; 西北工业大学动力与能源学院硕士生, 主要从事控制系统故障诊断技术研究

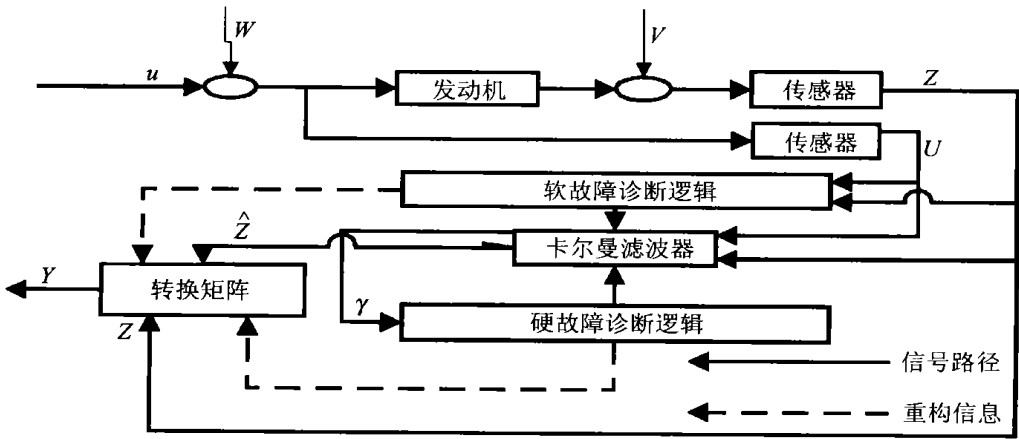


图 1 发动机控制系统传感器故障诊断结构图

Fig 1 Fault-diagnosis scheme of engine control system sensors

1 发动机控制系统传感器故障诊断原理及算法

1.1 发动机控制系统传感器故障诊断原理

发动机控制系统传感器故障诊断结构图如图 1, u 和 z 分别为发动机输入(燃油流量、尾喷口面积)、输出(高、低压转子转速, 高压压气机出口压力、低压涡轮出口温度), w 和 v 为系统噪声和测量噪声, U 和 Z 分别是可测量的发动机的输入和输出。卡尔曼滤波器用来产生 $Z(t)$ 的最优估计 $\hat{Z}(t)$ 以及滤波残差 γ 。

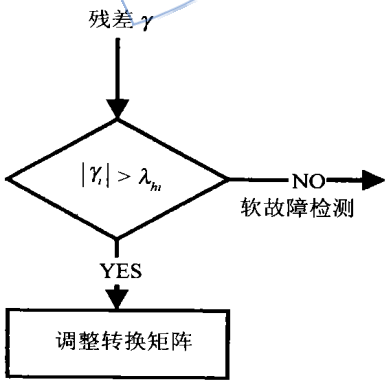


图 2 硬故障诊断逻辑示意图

Fig 2 Hard-failure detection logic

进行传感器故障检测与隔离的关键是先判断传感器是否发生故障, 以及哪个传感器发生故障, 才能对其隔离和进行状态重构。在 w 和 v 均为零均值的白噪声条件下, 当传感器没发生故障时, 滤波残差 γ 也是零均值的白噪声序列^[3, 4]; 而当传感器发生故障时, 此时的滤波残差 γ 不再是零均

值的白噪声序列, 传感器故障诊断就是通过滤波残差 γ 的变化来进行。

1.2 传感器硬故障诊断方法

传感器硬故障一般表现为传感器发生较大的突变性变化或输出信号在正常值基础上发生瞬时输出突变, 故障信号为尖峰脉冲或阶跃信号类型; 可以根据各传感器噪声的统计特性来设定门限值 λ_{hi} , 一旦滤波残差向量的分量的绝对值超出其自身的门限值 λ_{hi} , 就可以判断此传感器发生了故障, 并对其进行隔离, 由卡尔曼滤波器的估值 $\hat{Z}(t)$ 取代故障传感器的测量值 $Z(t)$ 。

传感器硬故障检测与隔离及重构结构示意图如图 2 所示, 硬故障检测门限值的选取如表 1 所示。由表 1 可看出, 硬故障检测门限值是其标准方差的 2 倍。

表 1 传感器硬故障检测门限值			
Table 1 Hard-failure detection threshold			
传感器	传感器号	标准偏差	硬故障检测门限值
XNLC	1	300 r/m in	600 r/m in
PT3	2	0.035 M Pa	0.070 M Pa
XNHC	3	300 r/m in	700 r/m in
T45C	4	20 K	40 K

1.3 传感器软故障检测与隔离

传感器软故障是指其输出信号在正常值基础上会发生缓慢的变化, 软故障检测、隔离、重构算法是基于多重故障假设基础上的, 每一假设由一

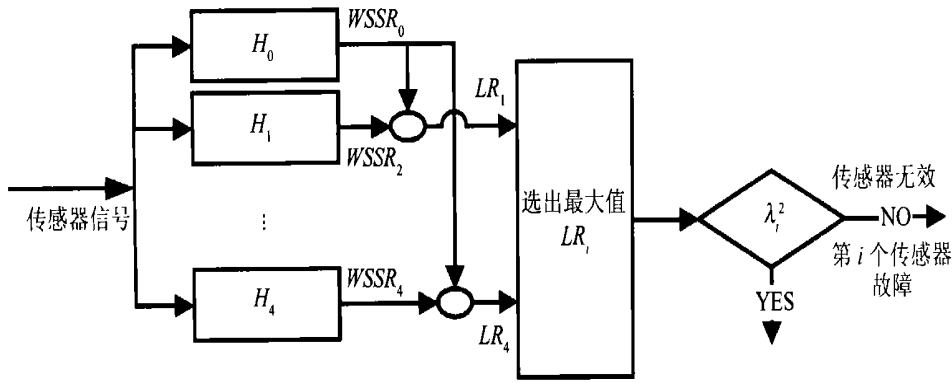


图 3 软故障诊断逻辑示意图

Fig 3 Soft-failure isolation logic

个卡尔曼滤波器构成,其结构如图 3 所示。

对于检测高、低压转子转速,高压压气机出口压力、低压涡轮出口温度等 4 个传感器软故障,用到 5 个假设滤波器(H_0 至 H_4),每个假设滤波器均采用同样结构的卡尔曼滤波器。假设滤波器产生一统计量,称为残差加权二乘方 $WSSR$ (Weighted Sum of Squared Residuals), $WSSR_i = Y_i^T \Sigma^{-1} Y_i$, 其中 $\Sigma = \text{diag}(\sigma^2)$, σ 是对应传感器的标准偏差。其中 H_0 用于正常模式,其卡尔曼滤波信息由所有 4 个发动机传感器的观测输出构成,而其余的 4 个用于故障模式,其构成如下: H_1 的卡尔曼滤波信息是除了第 1 个传感器即低压转子转速传感器的输出外的其余 3 个传感器的观测输出,同理有 H_2, H_3 和 H_4 卡尔曼滤波信息。

由于传感器无故障时,残差序列 Y 服从零均值的高斯分布,且其方差是正定对称矩阵,那么其残差加权二乘方 $WSSR$ 服从标准正态分布。当发动机传感器发生故障时,残差序列 Y 的白色特性被破坏,那么统计量就会发生较大的变化,因此通过检查 χ^2 的分布情况就可以判断软故障是否存在。又每一假设滤波器均产生一残差向量 Y_i , 在高斯白噪声已知的情况下,残差向量 Y_i 可用概率表示为 $L_i = p(Y_i) = k e^{-WSSR_i}$, 此处的 k 为常数, LR_i 就是将残差 Y_i 的 L_i 值分别除以正常模式的残差值 Y_0 的 L_0 值,然后对其商值取对数,可表示如下:

$$LR_i = \log \left(\frac{L_i}{L_0} \right) = WSSR_0 - WSSR_i$$

本文的软故障检测门限值的选取依据是残差 Y 服从高斯分布,那么统计量 LR_i 服从 χ^2 分布,给定虚警率 α ,查 χ^2 分布表得门限值 $\lambda^{[4]}$,具体值分别为: 2.71, 1.32, 3.84, 2.71。

2 仿真试验

以地面、发动机低压转子转速 97% 状态为例,采样周期 $T = 0.02$ s,图 4 至图 9 中,上图中实线表示传感器输出,点划线表示卡尔曼滤波曲线,横坐标表示采样点的个数;下图中实线表示残差,点划线表示故障检测门限值,横坐标表示采样点序列数。

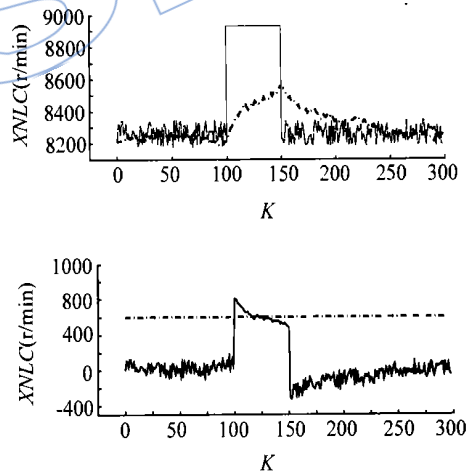


图 4 低压转子转速传感器发生硬故障时仿真曲线

Fig 4 simulation curve of hard-failure on fan speed sensor

2.1 单一传感器发生硬故障时的仿真试验

以低压转子转速传感器发生硬故障为例,此时其卡尔曼滤波曲线和残差曲线见图 4。可以看出,在第 100 个采样点开始给低压转子转速传感器加 700 r/min 的阶跃输入(即硬故障)时,其卡尔曼滤波残差在 101 个采样点时,残差值超过了低压转子转速传感器的故障检测门限值,给出报警信号,由此可进行故障隔离,由低压转子转速的

卡尔曼滤波估计来代替低压转子转速传感器的量测输出, 实现了低压转子转速的重构。

2.2 单一传感器发生软故障时的仿真试验

以高压压气机出口压力发生软故障为例, 压力传感器输出量的滤波曲线和假设滤波器的残差曲线见图 5。

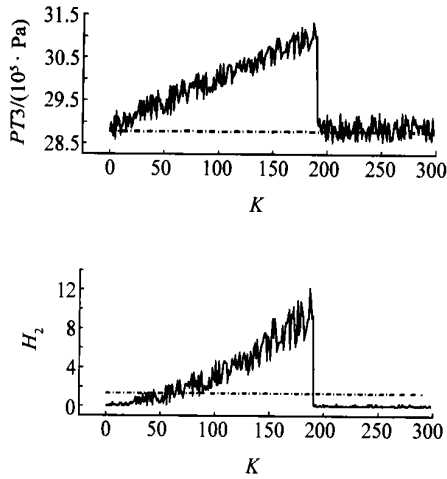


图 5 高压压气机出口压力传感器发生软故障时仿真曲线

Fig 5 Simulation curve of soft-failure on combustor inlet pressure sensor

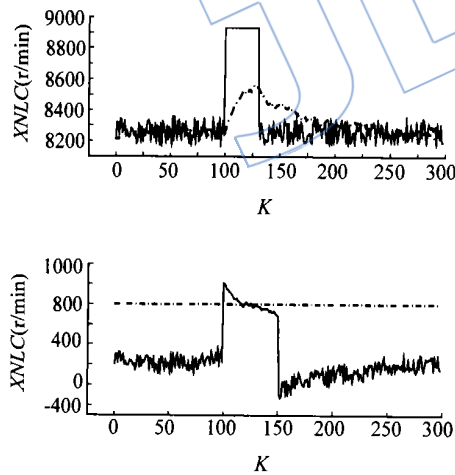


图 6 转速、压力传感器连续发生硬故障时仿真曲线
Fig 6 Simulation curve of continual hard-failure on fan speed and combustor inlet pressure sensor

当给压力传感器在第 10 个采样点开始加入斜率为 4% 漂移信号时, 当故障积累到其假设滤波器的滤波残差超出其软故障门限值时, 就给出报警, 然后隔离低压转子转速传感器的输出信号, 并用卡尔曼滤波器的滤波输出来代替压力传感器的输出信号, 实现状态的重构。

2.3 两个不同传感器连续发生硬故障时的仿真试验

以低压转子转速传感器和高压压气机出口压力传感器连续发生硬故障的情况为例分析。

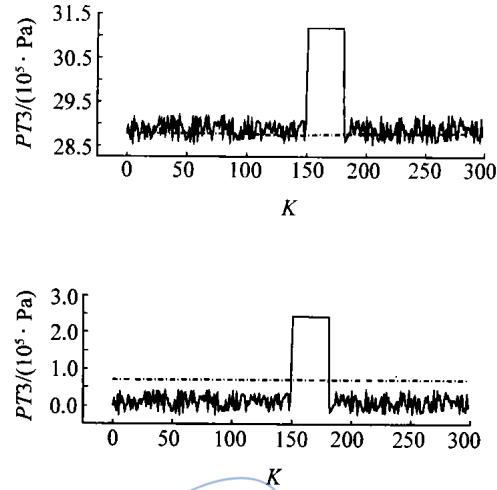


图 7 转速、压力传感器连续发生硬故障时仿真曲线
Fig 7 Simulation curve of continual hard-failure on fan speed and combustor inlet pressure sensor

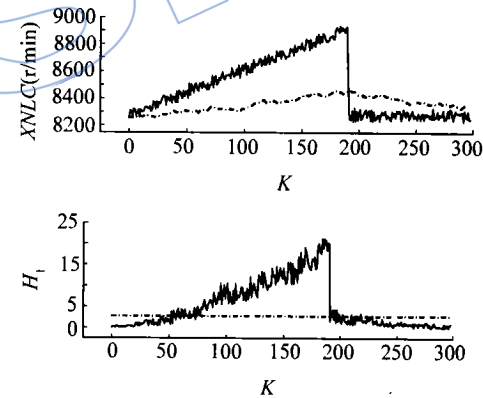


图 8 转速、压力传感器连续发生软故障时仿真曲线
Fig 8 Simulation curve of continual soft-failure on fan speed and combustor inlet pressure sensor

从图 6、图 7 可以看出, 低压转子转速传感器故障发生是在第 100 个采样点, 而压力传感器发生故障是第 150 个采样点, 两个传感器发生故障的时间间隔是 1 s。仿真结果表明, 本方法适用于检测两个传感器连续发生硬故障, 卡尔曼滤波残差能够及时的做出报警, 并能判别是哪两个传感器发生了故障, 以便进行隔离和重构。

2.4 两个不同传感器连续发生软故障时的仿真试验

两个传感器发生连续软故障时的情况, 仍以

低压转子转速传感器和高压压气机出口压力传感器为例,在仿真中,为区别于单个传感器发生软故障时所加漂移信号速率为 4%,这里加速率为 8% 的斜坡信号。

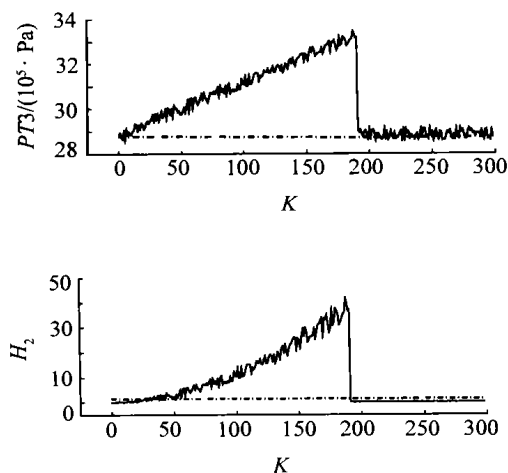


图 9 转速、压力传感器连续发生软故障时仿真曲线

Fig 9 Simulation curve of continual hard-failure on fan speed and combustor inlet pressure sensor

由上面的仿真曲线可以看出,当给转速和压力传感器在不同的采样点加入斜率为 8% 漂移信号时,当故障积累到其假设滤波器的滤波残差超出其软故障门限值时,就给出报警,并能判别是哪两个传感器发生了故障,及时进行隔离和重构。

3 结论与分析

通过仿真,对于本文所设计的传感器故障诊

断方法,可得到如下结论:

(1) 单个传感器硬、软故障可以在三个采样间隔时间内准确无误地检测。

(2) 两个传感器发生连续硬、软故障时,仍能在各自传感器发生故障的三个采样间隔时间内准确无误地检测出故障传感器。

(3) 当传感器发生故障后,本故障检测方法,使无故障传感器的输出信号不受影响,而对故障传感器通过卡尔曼滤波器进行故障隔离和输出重构,提高了发动机控制系统的可靠性。本文研究的方法是针对发动机线性模型的,当发动机线性模型与实际发动机特性之间存在较大误差时,还需要做进一步的研究。

参考文献

- [1] John C DeLaat, Walter C Merrill. Advanced Detection, Isolation, and Accommodation of Sensor Failures in Turbofan Engine, Real-Time Microcomputer Implementation [R]. NASA - 2925, 1990.
- [2] Walter C Merrill, John C DeLaat, William M Bruton. Advanced Detection, Isolation, and Accommodation of Sensor Failures- Real-Time Evaluation [R]. NASA Technical Paper 2740, 1987.
- [3] 俞济祥著. 卡尔曼滤波及其在惯性导航中的应用 [M]. 北京: 北京航空专业教材编审组, 1984.
- [4] 杨旭东, 何平, 胡恒章. 离散卡尔曼滤波器滤波精度与噪声统计模型准确度的关系 [J]. 电机与控制学报, 1999, 3 (2): 69- 72.
- [5] 许秀玲. X 型涡扇发动机控制系统传感器故障诊断 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.