

采用一组卡尔曼滤波器检测 发动机传感器故障

北京航空航天大学 汪声远^{**}

在发动机全功能数字电子控制系统中,提高传感器工作的可靠性是十分重要的,除了不断对传感器本身的性能加以改进提高外,现在广泛地采用了余度技术。近二十年来对解析余度 (Analytical Redundancy) 进行了广泛的研究,解析余度 (AR) 方法是基于各状态变量之间存在的解析关系,在系统可观条件下,利用无故障的输出测量值去估计 (构造) 已故障传感器正常工作状态时的输出信息,从而实现对故障的检测、隔离与重构,保证控制系统具有预定的控制性能。

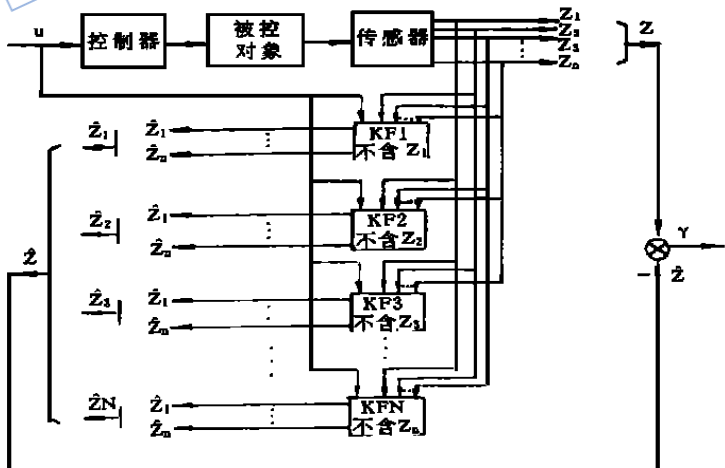
一、利用卡尔曼滤波残差对传感器故障进行检测与隔离的原理

实现解析余度的具体方法很多^[1,2],用卡尔曼滤波残差零均值的白噪声特性对传感器故障进行检测与隔离是其中之一。

设控制系统的离散化动态方程为

$$\begin{aligned} X(k+1) &= G(k+1, k) \cdot X(k) + \Gamma(k+1, k) \cdot W(k) + B(k+1, k) \cdot u(k) \\ Z(k) &= H(k+1, k) \cdot X(k) + V(k) \end{aligned}$$

式中 $u(k)$ 为控制向量, $W(k)$ 为动态噪声, $V(k)$ 为测量噪声, $W(k)$ 、 $V(k)$ 是零均白噪声随机序列。用卡尔曼滤波器对该系统状态进行估计,在正常情况下滤波残差 $Y(k) = Z(k) - H \cdot \hat{X}(k|k-1)$ 也是零均值白噪声随机序列,当传感器出现故障后,在输出测量中将出现一个增量 $f_s(k)$, $Z(k) = H \cdot \hat{X}(k) + V(k) + f_s(k)$, f_s 可能是阶跃突变,也可能是缓慢漂移,但不是随机噪声。这时



卡尔曼波残差已不再是零均白噪声,利用残差统计特性的这一变化,即可进行故障检测。由

于系统状态之间存在交链关系, 一个传感器出现故障后, 各状态一步最优预测残差均失去了零均值白噪声特性, 因此只用一个卡尔曼滤波器难以确定哪一个传感器出现了故障。

采用一组卡尔曼滤波器可以解决上述问题, 有效地对传感器故障进行检测与隔离。这组卡尔曼滤波器仅在滤波器的输入端有所区别, 当传感器均无故障时, 各滤波器的残差均为零均值白噪声序列; 如果某一传感器出现故障时, 含有该传感器输出信号卡尔曼滤波残差将失去零均值白噪声特性, 只有不含故障传感器输出值的卡尔曼滤波残差仍为零均值白噪声序列。比较各滤波器的残差, 即可利用逻辑关系判定哪一个传感器出现了故障, 其原理如图 1 所示。

当所有传感器输出测量值都参与反馈控制时, 故障传感器的输出将影响各状态变量, 从而各滤波器残差均失去零均值白噪声特性, 无法诊断哪一个传感器出现了故障。为此使传感器输出的采样频率高于反馈控制的采样频率, 在两步反馈控制之间, 作多步卡尔曼滤波, 使故障不会通过反馈传至全系统, 因此可以完成故障的检测与隔离。

二、双轴涡轮发动机传感器的故障检测

以双轴涡轮发动机低压轴转速 n_L 及涡轮后温度 T_4 为输出, 主燃油供油执行机构的输入为控制作用, 并设 $X_1 = n_L$, $X_2 = T_4$, $X_3 = m_f$, m_f 为供油量, 系统动态方程为

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 1 \end{bmatrix} u = AX + bu, \quad Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} X = HX$$

当采用状态反馈后构成闭环控制系统, 可得闭环动态方程

$$\dot{X} = (A + bK)X + b \cdot W + b \cdot K \cdot \xi + V1 + b \cdot K \cdot V2, \quad Z = H \cdot X + V2$$

式中 $V1 = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T$ 为动态噪声, $V2 = [v_4 \ v_5 \ v_6]^T$ 为测量噪声, 它们为互相独立的零均值白噪声, ξ 为传感器故障信息。对上述动态方程离散化, 可得到差分方程

$$X(k+1) = G \cdot X(k) + B \cdot W + F \cdot \xi + \Gamma \cdot V1(k) + F \cdot V2(k), \quad Z(k) = H \cdot X(k) + V2(k)$$

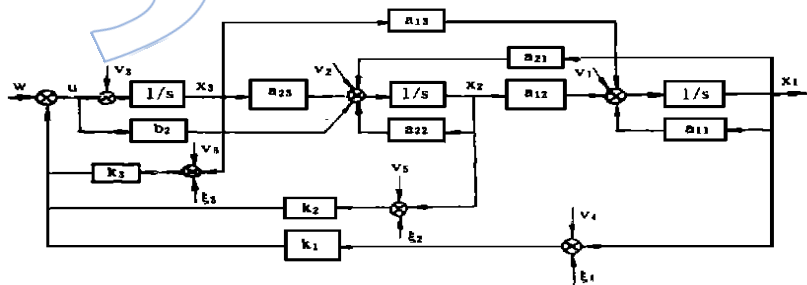


图 2 系统结构图

系统结构如图 2 所示。相应的离散卡尔曼滤波方程为:

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1) [Z(k+1) - H\hat{X}(k+1|k)]$$

$$\hat{X}(k+1|k) = G\hat{X}(k|k) + BW(k)$$

$$K(k+1) = P(k+1|k) \cdot H^T [H \cdot P(k+1|k) \cdot H^T + R_{k+1}]^{-1}$$

$$P(k+1|k) = G \cdot P(k|k) \cdot G^T + \Gamma \cdot Q_k \cdot \Gamma^T$$

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - K(k+1) \cdot H \cdot P(k+1|k)$$

根据前述故障检测原理及方程, 对传感器故障检测进行了仿真, 故障函数分别设置为阶

跃与斜坡函数。状态反馈的采样周期设为 0.05 秒，在相邻状态反馈两步采样间隔期间，进行了 10 次卡尔曼滤波，设置了三个卡尔曼滤波器，其输入分别为 $Z(k) = [Z_1(k) \ Z_2(k)]^T$ 、 $Z_1(k)$ 、 $Z_2(k)$ ，所得残差分别为 $E1(k) = [E11(k) \ E12(k)]^T$ 、 $E2(k) = [E21(k) \ E22(k)]^T$ 、 $E3(k) = [E31(k) \ E32(k)]^T$ ，其中 $E1 = f_1(Z_1, Z_2)$ ， $E2 = f_2(Z_1)$ ， $E3 = f_3(Z_2)$ ，设 $E1$ 、 $E2$ 、 $E3$ 的检测门限分别为 ω 、 ω 、 ω ，则有：当 $E1 > \omega$ ， $E2 > \omega$ ， $E3 < \omega$ 时， X_1 传感器故障；当 $E1 > \omega$ ， $E3 > \omega$ ， $E2 < \omega$ 时， X_2 传感器故障。

三、仿真曲线与结论

这里列出几组曲线。图 3、4 为 X_1 、 X_2 阶跃故障时的残差曲线；图 5、6 为 X_1 、 X_2 斜坡

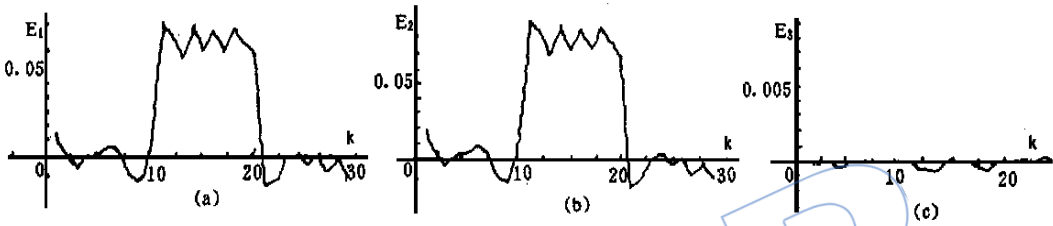


图 3 X_1 阶跃故障时的残差曲线

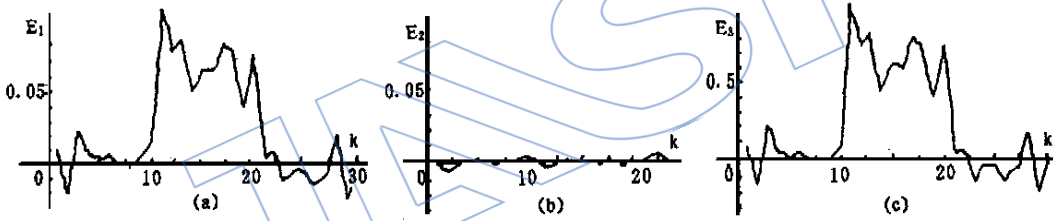


图 4 X_2 阶跃故障时的残差曲线

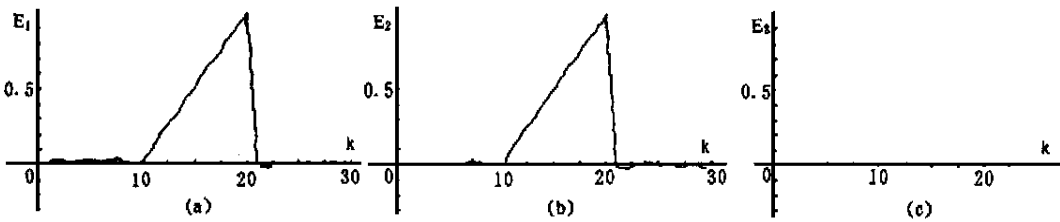


图 5 X_1 斜坡故障时的残差曲线

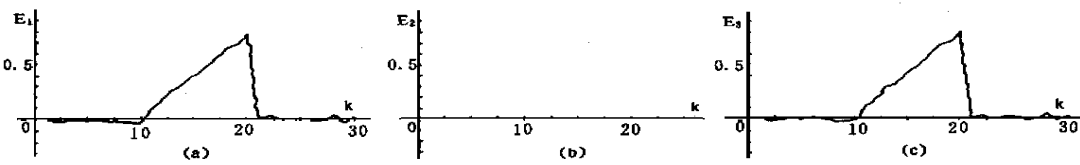


图 6 X_2 斜坡故障时的残差曲线

故障时的残差曲线。故障发生在 $K = 11 \sim 20$ 期间。各图中 a 为 $E1$, b 为 $E2$, c 为 $E3$ 。

参 考 文 献

- [1] Willsky A. S., "A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic System", Automatica Vol. 12, 1976.
- [2] Merrill W. C., "Sensor Failure Detection for Jet Engine Using Analytical Redundancy", J. of Guidance Vol. 8, No. 6, 1985.

优化程序

服务科研

发动机总公司评出优秀 S_1 流面计算程序

经过近一年的酝酿、筹备工作, 49 名专家、教授和工作人员于 10 月云集四川江油 624 所参加 S_1 流面计算程序上机考核和专家评审活动。通过 10 天紧张的调机、上机运行和专家评审工作, 评选结果于 11 月 1 日正式揭晓。进行如此重大的程序评审活动在我国航空发动机行业尚属首次。

评选出的优秀程序是:

涡轮综合第一: 叶栅 S_1 流面多重网格欧拉解通用计算程序 (H 网格) (中科院工程热物理所刘建军); 压气机亚音速第一: S_1 流面流函数解计算程序 (中科院北京科能中心华耀南); 涡轮跨音速第一: 叶栅 S_1 流面多重网格欧拉解通用计算程序 (C 网格) (中科院工程热物理所刘建军); 涡轮超音速第一: 任意回转面亚、跨音叶栅绕流计算程序 (中科院计算中心王平治)。

比较好的程序还有:

压气机跨音速: 叶栅 S_1 流面多重网格欧拉解通用计算程序 (H 网格) (中科院工程热物理所刘建军); 压气机超音速: 任意回转面叶栅 (含平面叶栅) S_1 流场计算机程序 (西北工业大学周新海)。

S_1 流面参数的计算是叶轮机械气动设计的一项重要内容, 它对于航空发动机的预研和型号研制有着不可缺的重要作用, 但目前航空发动机行业所使用的 S_1 程序不仅数量繁多, 而且各程序的运算精度、运行时间、适用范围、检错能力和理论方法等方面又存在一定差异, 这种状况已经难以满足当前和未来航空发动机设计工作的需要。因此, 急需对全行业使用的 S_1 程序进行一次全面考核, 以筛选出能够真正投入工程实用的优秀程序, 为航空发动机科研服务; 同时摸索出一条程序评审经验, 推动其它程序的评审工作, 也为工程程序的规范化、标准化打下良好基础; 更重要的是促进 S_1 程序的继续改进和发展。

今后, 发动机总公司将采取有力措施在全行业推广使用这些优秀程序, 并将根据具体情况继续开展其它程序的评审工作, 使程序评审、优化工作经常化和规范化。通过这次评审, 发现了 S_1 计算程序存在的不少问题, 为今后重点解决这些问题指明了方向。

共有来自部内外的 16 份 S_1 程序参加了评审, 经过对 15 道考题的运算, 共算通 16×15 道题中的 168 道题, 算通率达 70%。

发动机总公司

马恒儒

杜兵芳

FAILURE DETECTION OF ENGINE SENSORS WITH A BANK OF KALMAN FILTERS

Wang Shengyuan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A detection method is presented for sensor failures in FADEC engine. In order to avoid that the output of a fault sensor affects other system states through state feedback, we use a bank of Kalman filters in which different combinations of sensor outputs as inputs of the filters are fed to each filter. According to the characteristics of innovation sequences of each filter, the failure can be detected and isolated. The sample frequencies are different in feedback control path and computation of innovation sequences. When a failure has occurred in one sensor but before the failure affects other system states, the failure can be detected and isolated effectively. Therefore, the effects of failure on the outputs of other sensors are avoided. A digital simulation has been made for a rotational-speed and temperature control system of a twin-spool turbine engine. The simulation results show that this failure detection and isolation method is effective.

STUDY ON THE RELIABILITY EVALUATION OF ENGINE FUEL ACCESSORIES

Xue Jianhua, Ai Xianfeng, Liu Yiyu

(Xian Yuan Dong Machine Building Company)

ABSTRACT

Application of Bayes method to the reliability analysis of mechanical products is considered. The key to the application of Bayes statistics—selection of prior probability has been solved by means of comparison and discrimination. Bayes statistics is of universal significance for the reliability analysis of complicated mechanical products. Satisfactory results can be achieved if the proper selection of prior probability is made.

A SIMPLIFIED METHOD OF TRANSIENT MATHEMATICAL MODEL FOR NON-AUGMENTATION ENGINE

Yu Weifeng and Zhang Shaoji

(Shenyang Aeroengine Research Institute)

ABSTRACT

A simplified method of transient mathematical model for non-augmentation engine is presented, which is used in real-time simulation for developing engine control system. Two spool inertias are considered in the simplified model, which are the main factors for engine transient performance. The combination of engine steady characteristics with transient characteristics is used in the model. The simulation shows: (1) The model has better accuracy and fast operating speed. (2) The model has better flexibility, is easy to use in different engines. (3) The model is convenient for programming in C or FORTRAN language.