

故障诊断的神经网络观测器法

西北工业大学 张学峰* * 王镛根

【摘要】 以神经网络的自学习代替故障诊断观测器法中的解析计算, 提出了一种新的故障诊断方法, 从而解决了具有模型不确定性系统的故障诊断问题。对某型航空发动机控制系统传感器故障进行了仿真研究, 该方法不仅具有传统观测器法报警及时准确、易于实现容错控制的优点, 又不需要获得系统精确的数学模型, 对具有模型不确定性系统的故障诊断与容错很有效。

主题词: 神经网络 故障诊断 观测器

分类号: TP277

对航空发动机这样结构复杂、工作范围变化大、扰动因素多的这一类系统进行故障诊断时, 就必须考虑模型不确定性对故障诊断有效性的影响。神经网络的发展为解决具有模型不确定性的故障诊断问题提出了新思路。由于神经网络具有能充分逼近任意非线性函数的能力, 因此, 可将神经网络与基于模型的故障诊断方法相结合, 用于获得系统内部冗余关系, 提取故障信息, 实现系统的故障诊断与容错控制。

1 故障诊断的神经网络观测器法

考虑如下非线性系统

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k), \quad y_k = g(x_k, u_k) \quad (1)$$

u 为系统输入, y 为系统输出, x 为系统状态, $f(\cdot)$ 为非线性函数, $g(\cdot)$ 为非线性观测函数。假设系统的结构未知, 系统输入和传感器的输出已知, 只能利用传感器的测量值及系统的输入值来寻找传感器组内各传感器测量值之间的冗余关系, 获得有关故障的信息。在系统正常运行过程中, 每一个传感器的测量值是系统输入及运行状态的函数, 可表示为如下的输出方程:

$$y_{si}(k) = g_i[x(k), u(k)] \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

在系统是可诊断的情况下, 即满足 m 个传感器中任一个测量信息系统都是可观测的条件时, 下式成立

$$x(k) = g_i^{-1}[y_{si}(k), u(k)] \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

所以对任意两个传感器, 它们的测量值满足如下函数关系

$$y_{si}(k) = g_i[x(k), u(k)] = \Phi[y_{sj}(k)] \quad (i \neq j) \quad (4)$$

其中: y_{si} 和 y_{sj} 分别为第 i 和第 j 个传感器的测量值, Φ 为一未知函数。上式就明在 k 时刻每两个传感器的测量值之间均存在着一种函数关系, 也就是解析冗余关系。传统的观测器法是利用系统的数学模型通过解析计算来获得这种冗余关系, 但在系统结构未知的情况下, 该方法无能为力。由于神经网络具有很强的自学习能力, 因此可以通过学习来获得传感器测量值之间的冗余

关系,为故障诊断提供有效信息。

首先,应用传感器组中的任一个输出信号和系统输入作为神经网络的输入信号,将所有传感器的输出信号作为神经网络的输出信号,构成输入样本集合,应用 RBF 网络^[1-3]离线训练如下 m 个神经网络模型:

$$\hat{y}_{si}(k) = F_{Ni}[y_{si}(k), u(k)] \quad (i = 1, \cdots, m) \quad (5)$$

然后在线应用神经网络观测器可获得 m 组估值 $\hat{y}_{s1}, \hat{y}_{s2}, \cdots, \hat{y}_{sm}$, 其中 $\hat{y}_{si} = [\hat{y}_{s1}, \hat{y}_{s2}, \cdots, \hat{y}_{sim}]^T$ 是由第 i 个观测器得到的, 网络的输入和训练时的输入相同。

在系统正常运行时, 也即无故障时, $y_{si}(i = 1, 2, \cdots, m)$ 接近系统传感器的输出 y_s 。当第 i 个传感器故障而其余的 $m - 1$ 个传感器正常运行时, 由第 i 个神经网络观测器所得的传感器的输出估值 $\hat{y}_{si}$ 将会偏离 y_s , 而其它神经网络观测器的输出则不受影响, 仍接近 y_s 。则可利用如下的检测逻辑实现传感器故障检测与诊断。

定义阈值 $\epsilon > 0, j = 1, 2, \cdots, m$, 计算判别函数

$$\Delta_{ij} = |y_{sj} - \hat{y}_{sij}| \quad (i = 1, \cdots, m; \quad j = 1, \cdots, m) \quad (6)$$

其中 y_{sj} 为第 j 个传感器测量值, $\hat{y}_{sij}$ 为由第 i 个传感器的测量值获得的第 j 个传感器输出的估计值。

若 $\Delta_{ij} \geq \epsilon (i = 1, 2, \cdots, m)$, 且其它 $\Delta_{i\bar{j}} < \epsilon$, 则第 i 个传感器故障。

若 $\Delta_i < \epsilon (j = 1, 2, \cdots, i - 1, i + 1, \cdots, m)$, 则所有传感器均无故障。

上述神经网络观测器方法中, 假设对于一个传感器的输出, 系统是可观的, 这一条件有时很难达到, 此时与广义的观测器法对应, 可采用广义神经网络方法, 每一个神经网络由几个传感器的输出驱动, 来获得其余或本身输出的估计值。通过相应的检测逻辑即可实现传感器的检测与诊断。

2 航空发动机控制系统传感器故障诊断

考虑某型发动机在设计点处的输入及传感器输出曲线, 如图 1 所示。此时状态未知, 输入输出已知, 测量值之间存在隐含的冗余关系, 构成如下函数:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{11}(t) &= F_{n1}[u_1(t), u_1(t-1), u_2(t), u_2(t-1), y_1(t), y_1(t-1)] \\ \hat{y}_{12}(t) &= F_{n2}[u_1(t), u_1(t-1), u_2(t), u_2(t-1), y_1(t), y_1(t-1)] \\ \hat{y}_{21}(t) &= F_{n3}[u_1(t), u_1(t-1), u_2(t), u_2(t-1), y_2(t), y_2(t-1)] \\ \hat{y}_{22}(t) &= F_{n4}[u_1(t), u_1(t-1), u_2(t), u_2(t-1), y_2(t), y_2(t-1)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $F_m (m = 1, 2, 3, 4)$ 为神经网络观测器模型, u_1 和 u_2 分别为供油量和尾喷口面积, y_1 和 y_2 分别为 n_1 和 T_4^* 传感器测量值, $\hat{y}_{ij}$ 为应用第 j 组传感器的测量值而获得的第 i 个传感器输出的估计值。

通过 RBF 网络学习上面的函数, 可获得传感器 1 和 2 输出的几组估计值, 这些估计值是通过不同的传感器的测量信号得到的。这里假定每一时刻只有一个传感器发生故障, 采用如下的判别函数:

$$\Delta_{11} = |y_1 - \hat{y}_{11}|, \quad \Delta_{12} = |y_2 - \hat{y}_{12}|, \quad \Delta_{21} = |y_1 - \hat{y}_{21}|, \quad \Delta_{22} = |y_2 - \hat{y}_{22}| \quad (8)$$

定义阈值 $\epsilon > 0$, 则有如下的检测逻辑: (1) 当 $\Delta_{ij} < \epsilon (i = 1, 2)$ 时, 传感器无故障; (2) 当 $\Delta_{22} < \epsilon$ 而 $\Delta_i \geq \epsilon (i = 1, 2, 3)$ 时, 传感器 1 发生故障; (3) 当 $\Delta_{11} < \epsilon$ 而 $\Delta_i \geq \epsilon (i = 2, 3, 4)$ 时, 传感器

2 发生故障; (4) 当 Δ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) 中, 有 1 个或 2 个大于 ϵ 时, 神经网络建模有误差, 需继续学习。

图 1 中给出了在 150–200 时刻 n_l 传感器发生故障时各个判别函数曲线, 可以看出 150–200 期间除 Δ_{22} 较小外, 其它均出现一峰值。由此, 可利用上述的检测逻辑诊断出传感器 1 发生故障。当 n_l 传感器故障检测后, 可用 $\hat{y}_{21}$ 替代传感器输出 y_1 进行容错控制。另外, 在 $t < 50$, Δ_{22} 也出现一峰值, 但此时其它判别函数值均较小, 说明无传感器故障发生, 产生峰值

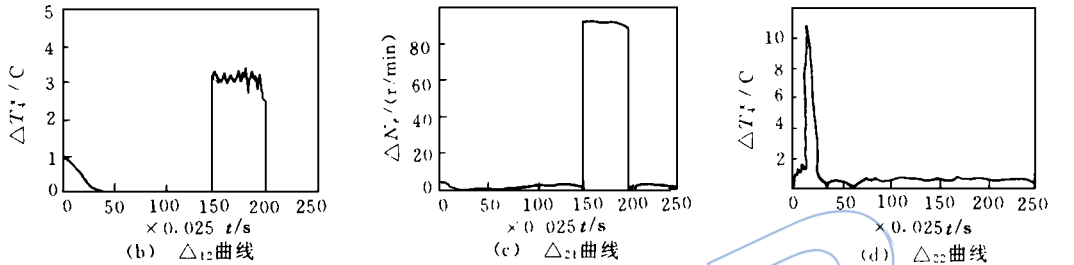


图 1 n_l 传感器发生故障时各个判别函数曲线

的原因是神经网络观测器建模误差所造成的, 经进一步学习, 则无峰值产生。

3 结 论

通过应用神经网络观测器法, 分别诊断了 n_l 传感器和 T_4^* 传感器的故障, 证明了该方法的有效性。由设计、仿真过程可知, 在整个过程中均未应用某型发动机模型, 故验证了该方法不需要系统的精确模型, 只需在模型发生变化时启动学习功能, 因而完全可用来解决有模型不确定性的系统传感器故障诊断问题。

参 考 文 献

- 1 张学峰. 针对航空发动机模型不确定性的故障检测、隔离与调整: [学位论文]. 西北工业大学, 1996
- 2 Chen S, Billings S A, Grant P M. Recursive Hybrid Algorithm for Nonlinear System Identification Using Radial Basis Function Networks. Control, 1992, (55) 5: 1051–1070
- 3 Willsky A S. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems. Automatic, 1976, 12(6): 601–606

(责任编辑 王庆康)

stand larger unbalanced load than Squeezed Film Damper. As a kind of dry-friction damper, RMRD can work under very high or low temperature for a long period of time. It is especially suitable for High Pressure Liquid Hydrogen (Oxygen) Pumps of rocket engines working under very low temperature.

Key Words Rotors Dampers Absorbers

AN INVESTIGATION ON IGNITION PERFORMANCE OF A CATALYTIC IGNITER AT HIGH ALTITUDE

Dong Kang

(*Qingling Company, AVIC, Xiping 7131017*)

He Xiaoming, Han Qixiang, Tan Haoyuan

(*2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016*)

ABSTRACT An experimental investigation on performance of a catalytic igniter made of platinum/rhodium catalyst has been conducted in a turbofan engine afterburner. Its ignition delay was measured under the conditions: the static pressure of 0.04–0.115 MPa; the inlet total temperature of 673–773 K; the velocity at the lip of igniter cone $\lambda = 0.20$ –0.36. The investigation simulates the operation of the engine's afterburner when aircraft flies at an altitude of 18000 m and the Mach number of 1.0. The experiments on performance of the igniter for igniting of 1100 runs at normal pressure were also conducted to verify the longevity of the catalytic igniter.

Key Words Catalytic ignition Afterburners Aircraft engines

ANN-BASED OBSERVER FAILURE DETECTION

Zhang Xuefeng and Wang Yonggen

(*7th Dept. Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072*)

ABSTRACT An Artificial Neural Network (ANN)-based observer failure detection method is presented, which uses ANN's self-learning ability instead of analytical computation of the observer design to get the redundancy relationship of the system. In order to deal with the failure detection of model uncertainty system, the failure detection of the control system sensor of a given aeroengine has been simulated with the presented method. The simulation shows that this method not only has the advantage of the observer failure detection method, but also has no need for the precise model of system. It is useful to the failure detection of the model uncertainty system.

Key Words Neural networks Failure Detection Observer

ANN-BASED MMAF FAILURE DETECTION

Wang Yonggen and Zhang Xuefeng

(*7th Dept. Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072*)

ABSTRACT Artificial neural network (ANN) and Multiple Model Adaptive Filter (MMAF) are combined in a new failure detection method-ANN-based MMAF, which uses ANN's self-learning ability instead of analytical computation of the filter design. Numerical simulations of an aeroengine have been performed to detect the sensor failure of the control system. The results show that this method not only can detect the failure of the system with an uncertain model, but also has self-learning ability for the unknown failure pattern.