

文章编号: 1000-8055(2007)05-0833-05

航空发动机的模糊故障诊断 方法研究

蔡开龙, 谢寿生, 吴 勇
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 提出了一种基于 T-S 模糊模型的故障诊断方法, 该方法从样本空间提取模糊规则, 在模糊系统参数最优化的同时实现了对模糊系统结构的自适应优化, 并给出了故障判定的阈值确定方法. 以某涡扇发动机定检稳态的机载记录数据为依据, 将基于 T-S 模糊模型的故障诊断方法应用于航空发动机, 研究结果表明, 该方法能准确地判定某涡扇发动机的健康状况, 将其应用于航空发动机故障诊断是可行、有效的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 涡扇发动机; 故障诊断; T-S 模糊系统; 健康状况

中图分类号: V231

文献标识码: A

Study on fuzzy fault diagnosis of aero-engines

CAI Kai-long, XIE Shou-sheng, WU Yong

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: An algorithm of fault diagnosis based on T-S fuzzy model was proposed. In the algorithm, fuzzy rules were obtained from sample book data. The structure of fuzzy system is adaptively optimized when the parameters of fuzzy system are optimized. A method to determine fault diagnosis threshold was introduced. According to the airborne recorded aero-engine steady state data obtained during fixed time check, the algorithm was used to diagnose the turbofan engine fault. The results show that the algorithm can exactly diagnose some turbofan engine fault. This shows the feasibility of applying this algorithm to aeroengine fault diagnosis.

Key words: aerospace propulsion system; turbofan engine; fault diagnosis; T-S fuzzy system; health condition

航空发动机健康状况监视是延长发动机使用寿命、保证发动机安全工作和飞行安全的一种重要措施. 随着科学技术的发展, 现代发动机结构越来越复杂, 故障的影响因素众多, 甚至一些故障的机理尚不清楚, 这就导致了故障信号的非平稳性、故障的不确定性和故障与征兆之间的非线性对应关系. 目前, 应用于航空发动机故障诊断的方法主要有基于直接测量及信号处理的故障诊断方法、基于模型的故障检测与诊断方法; 但是, 由于随机

干扰以及各种瞬态过程的存在, 使得基于直接测量及信号处理的方法在检测故障的及时性和准确性方面存在一定困难, 而基于模型的故障检测与诊断方法随着模型的不同形式, 对检测与诊断故障的可分离性及鲁棒性有不同的影响.

近年来, 神经网络由于具有自组织、自学习、自适应等特点使其而在故障诊断领域得到了一定的研究^[1-3], 但神经网络存在的不足 (如局部极小、初值和隐层神经元结构选取等) 使得它在故障诊

收稿日期: 2006-04-18; 修订日期: 2006-07-03

基金项目: “军队 2110 工程基金项目”和“空军工程大学优秀博士学位论文创新基金(BC0502)”资助

作者简介: 蔡开龙(1979-), 男, 江西上饶人, 博士生, 主要从事航空推进系统控制与状态监控方面研究.

断中的应用效果远不如期望值^[4],限制了其优势的发挥.自从 Zadeh 引入模糊数学后,由于模糊系统的结构参数具有明确的物理意义以及可以将专家知识和熟练操作人员的经验知识融入模糊系统等特点,使其在故障诊断中得到了广泛的研究^[5,6,7].本文研究了基于 T-S 模糊模型的故障诊断方法在航空发动机故障诊断中的应用,通过该模糊故障诊断方法对某涡扇发动机定检稳态故障的诊断表明,将基于 T-S 模糊模型的模糊诊断方法应用于航空发动机是行之有效的.

1 故障诊断方法

1.1 T-S 模糊模型描述

对于一个多输入-单输出(MISO)非线性系统,其 T-S 模糊模型可以由如下一组规则组成

R_k : if x_1 is A_{1k} and x_2 is A_{2k} and $\cdots$ and x_m is A_{mk} then

$$y_k = p_{0k} + p_{1k}x_1 + p_{2k}x_2 + \cdots + p_{mk}x_m \quad (1)$$

$$y = \sum_k \omega_k y_k / \sum_k \omega_k \quad (2)$$

$$\omega_k = \prod_{i=1}^m A_{ik}(x_i) \quad (3)$$

$$A_{ik}(x_i) = \exp[-(x_i - c_i)/\sigma_i^2] \quad (4)$$

$$d_k = \omega_k / \sum_k \omega_k \quad (5)$$

式(1)~(5)中, R_k ($k=1,2,\cdots,N$) 为第 k 条规则, x_i ($i=1,2,\cdots,m$) 为第 i 个输入变量, A_{ik} 为第 i 个输入变量的模糊子集, y_k 为第 k 条规则输出, p_{jk} ($j=0,1,\cdots,m$) 为第 k 条规则的后件线性参数, y 为模糊模型输出, ω_k 为第 k 条规则的满足程度(本文采用乘积推理运算规则), $A_{ik}(x_i)$ 为 x_i 对模糊子集 A_{ik} 的隶属度函数值(本文采用式(4)的高斯型隶属度函数), c_i 和 σ_i 为高斯型隶属度函数的中心和宽度.

1.2 模糊规则库的建立

设输入量 x_i ($i=1,2,\cdots,m$) 的模糊子集已知,且为 A_{il} ($l=1,2,\cdots,n$) (n 为输入量 x_i 模糊子集数).若输入数据 $x_i(k)$ 相对于它的各个模糊子集的隶属度函数值满足

$$u_{A_{il}}(x_i) = \max\{u_{A_{i1}}(x_i), u_{A_{i2}}(x_i), \cdots, u_{A_{in}}(x_i)\} \quad (6)$$

则认为输入数据 $x_i(k)$ 是 A_{il} ($l=1,2,\cdots,n$),即模糊规则的前提部.由于模糊规则的结论部是确定性输出,因此,就可以根据输入输出数据建立 T-S

模糊模型的模糊规则库.

1.3 模型参数确定

由式(1)~式(5)可知,模糊模型待确定参数有两部分:前件参数和后件参数.前件参数即模糊规则前提部分高斯型隶属度函数的中心 c_i 和宽度 σ_i ,后件参数即模糊规则结论部分的线性参数.

由于后件参数是线性参数,因此,可以采用最小二乘法求解.对于一个 MISO 系统,若其第 j 组输入输出数据为 $(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{mj})$ 和 y_j^* ($j=1,2,\cdots,h$),则式(2)用矩阵表示为

$$Y = XP \quad (7)$$

其中, $Y = [y_1^*, y_2^*, \cdots, y_h^*]^T$;

$$P =$$

$$[p_{01}, \cdots, p_{0N}, p_{11}, \cdots, p_{1N}, \cdots, p_{m1}, \cdots, p_{mN}]^T$$

$$X =$$

$$\begin{bmatrix} d_{11}, \cdots, d_{N1}, d_{11}x_{11}, \cdots, d_{N1}x_{11}, \cdots, d_{11}x_{m1}, \cdots, d_{N1}x_{m1} \\ d_{12}, \cdots, d_{N2}, d_{12}x_{12}, \cdots, d_{N2}x_{12}, \cdots, d_{12}x_{m2}, \cdots, d_{N2}x_{m2} \\ \cdots \\ d_{1h}, \cdots, d_{Nh}, d_{1h}x_{1h}, \cdots, d_{Nh}x_{1h}, \cdots, d_{1h}x_{mh}, \cdots, d_{Nh}x_{mh} \end{bmatrix}$$

因此,后件参数在最小二乘意义下的最优解为

$$P = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (8)$$

由于高斯型隶属度函数是一个非线性函数,因此,前件参数可以采用各种最优搜索算法进行优化计算.本文采用梯度下降法对高斯型函数的中心 c_i 和宽度 σ_i 进行优化计算.

设性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \sum_j^h (y_j^* - y_j)^2 / h \quad (9)$$

式中, h 是系统输入输出数据对数, y_j^* 和 y_j 分别是第 j 组输入数据所对应的系统输出值和模型输出值.

因此,前件参数的最优解即使性能指标式(9)达到最小的中心 c_i 和宽度 σ_i .其算法如下:

$$c_i(l+1) = c_i(l) - \rho \frac{\partial J}{\partial c_i}$$

$$\frac{\partial J}{\partial c_i} = \frac{y_i^* - y_i}{h} y_{jk} (1 - d_{kj}) d_{kj} \frac{2(x_{ij} - c_i)}{\sigma_i^3} \quad (10)$$

$$\sigma_i(l+1) = \sigma_i(l) - \rho \frac{\partial J}{\partial \sigma_i}$$

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma_i} = \frac{y_i^* - y_i}{h} y_{jk} (1 - d_{kj}) d_{kj} \frac{2(x_{ij} - c_i)^2}{\sigma_i^4} \quad (11)$$

其中,学习因子 $\rho \in (0,1)$,起着调节收敛速度的作用.

1.4 模型结构优化

T-S 模糊模型的结构优化就是对输入模糊空间进行划分,即确定输入量的模糊子集数。在实际系统中,若模糊子集划分得过细,虽然能提高模型的精度,但是模型的规则数和复杂度都将增加;若模糊子集划分得过稀,虽然它能降低模型的规则数和复杂度,但同时它也会丢失某些信息,降低模型的精度。因此,模糊子集的划分应该同时满足模型精度和复杂度要求,一般输入量的模糊子集数取为 $3 \sim 10$ [8]。

T-S 模糊模型输入量模糊子集划分的方法是:先将输入矢量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ 中的某一个输入量 $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 作为变量,而其余暂且作为常量考虑,先确定 x_i 的模糊子集数,然后依次确定其它输入量的模糊子集数,其具体步骤如下:

(1) 设输入量 x_i 在其论域上的模糊子集数初始值为 q_i^a (一般取为 3), 且 $a = 0$;

(2) 将 x_i 的隶属度函数均匀分配在其论域上,其宽度 σ 初值取为相邻两中心的均值,且记为 c_{ib}^l 和 $\sigma_{ib}^l (b = 1, 2, \dots, q_i^a), l = 0$;

(3) 建立模糊模型的模糊规则库,并由式(4)将样本数据转换成论域上的基于参考模糊子集的一组模糊集合的可能分布;

(4) 由式(8)求得后件参数值,并计算式(9)的性能指标 J_i^l ;

(5) 判断 $\delta = |(J_i^l - J_i^{l-1}) / J_i^{l-1}| \leq \varepsilon$ (ε 是给定的一个任意小常数)是否成立或模糊子集数是否最大? 若否则继续下一步,否则跳转到(7);

(6) 置 $l = l + 1$, 由式(10)~(11)求取新一组 c_{ib}^l 和 σ_{ib}^l , 并转向(3);

(7) 计算并判断式(9)的性能指标 $J_i^l \leq \xi$ (ξ 是给定的一个任意小常数)是否成立? 若否,则置 $a = a + 1, q_i^a = q_i^a + 1$, 并转至(2), 否则继续下一步;

(8) 输出结果 $q_i^a, c_{ib}^l, \sigma_{ib}^l$ 和 J_i^l 。

通过上述方法就能得到 T-S 模糊模型的最优化结构和前件参数、后件参数的最优解。

2 故障判定的阈值确定

故障判定的阈值范围一般可根据模型误差的标准方差大小确定,如可取标准方差的 $n(1 \sim 5)$ 倍。本文根据样本数据的验证,确定阈值为 5 倍的标准方差。当阈值确定以后就可以根据模型输出

来判定发动机的健康状况。当输入实测数据,模型输出结果在正常阈值范围内,则判断发动机正常;如在故障阈值范围内,则判断发动机故障。

3 某涡扇发动机定检稳态故障诊断的数学描述

本文研究的是定检稳态时的发动机故障诊断。定检稳态是指发动机定检时,处于训练战斗(YB)或战斗(B)状态的加力状态或最大状态。定检稳态故障诊断指通过发动机处在定检稳态时,利用飞参记录的有关发动机参数对发动机进行故障诊断。其故障诊断模型可描述为如下形式

$$y = f(T_1^*, T_5^*, N_1, N_2, \alpha, \alpha_e, \phi_{PC}, p_M, B) \quad (12)$$

式中, T_1^*, T_5^* 分别为发动机进口总温和涡轮后燃气总温, N_1, N_2 分别为发动机的低压转子转速和高压转子转速, α, α_e 低压压气机进口导向器叶片转角、高压压气机静子叶片转角, ϕ_{PC} 为尾喷口指示值, p_M 为滑油压力, B 为发动机中介机匣振动值。由于所采用的故障样本数据不清楚是何故障,为此, y 输出取值为:正常数据输入时取为 1;故障数据输入时取为 0。

4 基于 T-S 模型的航空发动机故障诊断结果

4.1 论域归一化处理

为了提高故障诊断精度和模型的使用范围,本文将输入量的论域全部归一化为 $[0, 1]$ 区间,待训练完毕后再将其恢复至原数据区间。

4.2 诊断结果

本文以定检稳态的加力状态为例(定检稳态的最大状态可类似处理),研究了 B 加力和 YB 加力状态下的故障诊断情况。从发动机工作参数的匹配关系可知,在定检 B 加力与 YB 加力两种情况下,式(12)的 9 个实测参数间的对应关系是不一样的,在这两种状态下所建立的模糊规则库或模糊模型是不同的,因此,有必要对这两种状态分别建立各自的 T-S 模糊模型。

对 B 和 YB 两种加力状态都选取 13 组正常和 13 组故障数据 [9] 作为学习样本建立各自的 T-S 模糊模型。模糊模型建立后,分别对两种状态样本数据进行回顾性检验,其结果如图 1 所示。

图 1 中,定检 B 加力正常数据、定检 B 加力故障数据、定检 YB 加力正常数据、定检 YB 加力故障

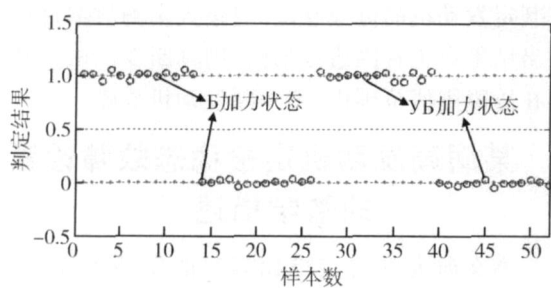


图 1 B和 YB加力状态下学习样本的故障诊断结果

Fig.1 Fault diagnosis results for learing stylebook in Band YBafterburning state

数据诊断结果分别在区间 $[0.947\ 8,1.052\ 2]$, $[-0.036\ 6,0.035\ 1]$, $[0.940\ 9,1.041\ 1]$ 和 $[-0.035\ 1,0.039\ 6]$ 内.

对现有正常和故障样本的模型输出结果作均值和方差分析,并根据样本输出结果的均值和标准差确定故障诊断的阈值范围,结果如表 1.

表 1 样本输出结果分析及阈值范围确定
Table 1 Analysis of stylebook output results and threshold range

状态	B加力	YB加力
正常样本均值	1.006 4	1.010 0
正常样本标准差	0.025 9	0.027 2
正常阈值范围	$[0.870\ 5,1.129\ 5]$	$[0.864\ 0,1.136\ 0]$
故障样本均值	0.020 6	-0.007 2
故障样本标准差	0.022 3	0.023 6
故障阈值范围	$[-0.111\ 5,0.111\ 5]$	$[-0.118\ 0,0.118\ 0]$

从图 1 和表 1 的结果可知,某涡扇发动机的 T-S 模糊诊断模型能正确诊断定检稳态的 B和 YB加力状态的故障.为了验证 T-S 模糊模型的泛化能力,另外选取这两种状态下的 9 组正常数据和 3 组故障数据^[9]作为测试样本,在已经建立的模糊诊断模型的基础上,若测试样本某一组输入量不满足所得的模糊规则库的前提部分时,就对该组测试样本建立一条新的规则,并增加到原有规则库中,最终得到的诊断结果如图 2 所示.

图 2 中,定检 B加力正常测试数据、定检 B加力故障测试数据、定检 YB加力正常测试数据、定检 YB加力故障测试数据诊断结果分别在区间 $[0.930\ 9,1.078\ 6]$, $[-0.053\ 7,0.069\ 1]$, $[0.954\ 6,1.057\ 5]$ 和 $[0.018\ 5,0.047\ 6]$ 内.由表 1 和图 2

可知,T-S 模糊诊断模型对定检 B加力和定检 YB加力的测试样本都能正确判定.

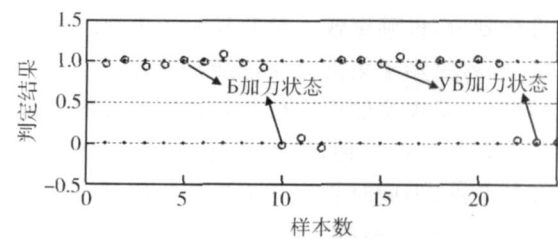


图 2 B和 YB加力状态下测试样本的故障诊断结果

Fig.2 Fault diagnosis results for testing stylebook in Band YBafterburning state

由图 1、图 2 和表 1 可知,该型发动机的 T-S 模糊诊断模型对定检加力稳态的故障识别精度是较高的.此外,文献[9]采用基于 RBF 神经网络的故障诊断模型得到定检 B加力正常训练样本、定检 B加力故障训练样本、定检 YB加力正常训练样本、定检 YB加力故障训练样本和定检 B加力正常测试样本、定检 B加力故障测试样本、定检 YB加力正常测试样本、定检 YB加力故障测试数样本的诊断结果分别位于区间 $[0.886\ 5,1.058\ 0]$, $[-0.072\ 0,0.078\ 0]$, $[0.869\ 9,1.079\ 8]$, $[-0.049\ 3,0.039\ 9]$ 和 $[0.754\ 6,1.225\ 7]$, $[-0.016\ 3,0.083\ 1]$, $[0.850\ 5,1.237\ 3]$, $[-0.091,0.106\ 7]$.由此可见,本文基于 T-S 模糊模型的故障诊断结果要明显高于基于神经网络的故障诊断结果.

当然,为了使该模型对同型号不同发动机的定检稳态数据都能保持较高的识别精度,应增加更多的正常及故障典型样本,尤其应收集更多的故障数据,建立该型发动机的故障模糊规则库,这样才能提高该模型对发动机故障的识别能力.

5 结 论

通过以上的研究,可以得出如下结论:

(1) 由图 1、图 2 和表 1 可知,本文提出的基于 T-S 模糊模型的某涡扇发动机故障诊断模型对学习样本和测试样本都能对故障进行准确的判定,该故障诊断模型具有较高的精度和较强的泛化能力;而且故障诊断精度要高于基于神经网络的故障诊断模型;

(2) 本文建立的航空发动机 T-S 模糊故障诊断模型可以根据新数据不断扩充原有模糊模型的规则库,从而提高模型的辨识精度和适用范围;

(3) 航空发动机是一个十分复杂的系统,故障类型也绝不只是故障与非故障,为了能更加有效地排除故障,明确故障类型是十分必要的,由于缺少样本,本文只对故障与非故障两类进行了判定,今后应该收集更多的各类故障数据,以提高对发动机故障的识别能力,并开发相应的故障诊断与实时性能趋势监控软件。

参考文献:

- [1] 谢寿生,樊思齐.自适应变结构神经网络在航空发动机故障诊断中的应用[J].航空动力学报,1997,12(4):367-370.
XIE Shousheng, FAN Siqi. Application of adaptive variable neural network to aeroengine failure diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(4): 367-370.
- [2] YANG Erfu, ZHANG Zhenpeng, LIU Guoqiu, et al. Real-time system for condition monitoring of propulsion system using BP-ART hybrid neural networks[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(6): 10-15.
- [3] HUANG Xianghua. Sensor fault diagnosis and reconstruction of engine control system based on autoassociative neural network[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2004, 17(1): 23-27.
- [4] 徐启华,师军.基于支持矢量机的航空发动机故障诊断[J].航空动力学报,2004,20(2):298-302.
XU Qihua, SHI Jun. Aeroengine fault diagnosis based on support vector machine[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 20(2): 298-302.
- [5] Pashayev A, Askerov D D, Sadiqov R A, et al. Fuzzy-neural approach for aircraft gas turbine engines diagnosing[R]. AIAA First Intelligent Systems Technical Conference 22-24 September 2004: 1-15.
- [6] 李霁红,康锐,贾颖.复杂系统的模糊故障诊断方法研究[J].系统工程与电子技术,2005,27(7):1322-1324.
LI Jihong, KANG Rui, JIA Ying. Study on fuzzy fault diagnosis for complex systems[J]. System Engineering and Electronics, 2005, 27(7): 1322-1324.
- [7] 贾智伟,李应红,雷晓桦.基于模糊综合承数的故障诊断[J].系统工程与电子技术,2004,26(3):416-417.
JIA Zhiwei, LI Yinghong, LEI Xiaoben. Fault diagnosis based on fuzzy integrated function[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(3): 416-417.
- [8] 诸静.模糊控制理论与系统原理[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 胡金海.航空发动机性能监控与故障诊断研究[D].西安:空军工程大学,2003.