

基于人工智能方法的传感器故障诊断技术

王志武

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 在液体火箭发动机地面试验过程中, 传感器的失效率远高于发动机部件、组件的故障率, 因而提出了采用基于人工智能的方法对传感器的故障进行检测与诊断。本文对基于人工智能方法用于传感器故障检测与诊断的特点进行了分析, 并分别应用 BP 神经网络和自适应神经模糊推理系统 (ANFIS) 对某次传感器的故障进行检测。结果证明基于人工智能的方法稳定可靠, 具有良好的工程应用前景。

关键词: 人工智能; 传感器; 故障诊断

中图分类号: V434.3

文献标识码: A

文章编号: (2005)05-0055-04

A fault detection method based on artificial intelligence for sensors

Wang Zhiwu

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In rocket engine ground hot tests, the probability of sensor fault is much larger than components of the rocket engine, so methods based on artificial intelligence (AI) are proposed for sensor fault detection and diagnosis. The characteristics of AI methods are analyzed and a factual example is presented by Back Propagation neural network and Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS). The result shows that the AI methods are steady in running, so it is of great engineering application value.

Key words: artificial intelligence; sensor; fault detection and diagnosis

1 引言

在航天领域, 推进系统的高可靠性要求得到

了普遍重视与关注, 因此对液体火箭发动机的工作过程进行检测与诊断就显得非常迫切和必要, 其中, 传感器是故障检测与诊断系统中的主要工具。随着推进系统复杂程度的提高, 在检测与诊

断系统中使用传感器的数量和种类也越来越多,其工作环境也越来越恶劣。传感器性能的不稳定或安装操作时的失误,往往会产生错误的监测信号,其后果是十分严重的。实际上,由于传感器设计、制造水平和工作环境等因素的影响,传感器的失效率比发动机部件、组件的故障率要高的多。因此,对传感器进行现场故障检测和隔离的要求日益强烈。

为了能够确认故障检测与诊断系统中输入的传感器数据可靠而准确,从 20 世纪 80 年代后期以来,国外对传感器故障的检测、辨识和传感器信息的确认进行了相关研究并取得一些初步的成果,其目标是在发动机故障检测与诊断系统中,设置传感器自动确认子系统。近年来,以神经网络技术为代表的人工智能方法开始应用于传感器故障诊断领域,这是航天推进系统故障检测与诊断技术发展的一个重要方向。

2 传感器故障诊断技术

传感器的故障一般分为“硬故障”和“软故障”两种。前者指突然发生的损坏或完全失效,这种传感器故障是较易识别的。后者是指一些缓慢的变化,如偏置、零位漂移或标定系数偏移,这些是难以对付的,也是研究的重点。目前,对传感器进行故障诊断的方法^[1]可分为以下几类:

(1) 基于数学模型的方法,包括参数估计法、一致空间法和观测器法等。对于基于数学模型的方法,其基本思想是将被监视系统的正常模型与运行中的实际模型相比较,从其差别上判断传感器是否出现故障。这种方法的优点是全部以软件实现,对原有的硬件系统无任何影响,但此方法的实现大多依赖于对系统的实时建模,使得这种技术难以在复杂、时变非线性、信噪比低的系统中应用,而且如果需要诊断的传感器数量较多时,困难就更大。

(2) 基于信号处理的方法,主要有经典信号处理方法和最近兴起的小波分析及分形理论等。小波分析是一种变尺度时-频分析工具,通过对传感器信息的小波分解,可以有效提取其故障信息;

万方数据

分形理论是通过计算传感器信号的分形维数来检测传感器故障。

(3) 基于人工智能的方法,包括神经网络法、知识推理法、故障特征树搜寻法、模糊隶属度法等。神经网络(Neural Network)由于在非线性大规模并行处理方面的特点,以及其鲁棒性、容错性及自学习能力,20 世纪 80 年代末开始被用到测量技术中,并出现了神经网络和模糊理论相融合的趋势^[2]。基于定性模型的方法近年来在欧洲受到高度重视,得到了迅猛发展,文献[3]将其应用于液体火箭发动机的故障诊断。

3 基于人工智能方法的传感器故障诊断技术

基于人工智能的方法用于传感器故障诊断的特点在于:(1) 避免了建立系统输入和输出间复杂的数学模型的困扰,针对基于数学方法难以解决的复杂、时变非线性问题,能够很好地予以解决,实现输入和输出间的任意非线性映射;(2) 具有良好的自适应性和较强的学习、联想和识别功能,根据环境提供的信息,自动进行联想、记忆及聚类等方面的学习,从而达到自我完善;(3) 具有很强的鲁棒性,当外界输入到系统中的信息存在某些局部错误时,不会影响到整个系统的输出性能,适应于在线学习。

3.1 基于神经网络的传感器故障诊断技术

由于神经网络具有非线性映射、自学习能力、抗噪声等特点,在传感器故障诊断领域的应用主要有两个方面:

3.1.1 应用神经网络作为分类器进行故障检测

根据传感器信号之间的相关性,判断是否存在某个传感器输出不符合这种相关性,由此检测传感器故障。对于液体火箭发动机这样复杂的系统,可以采用概率神经网络判断多个传感器是否同时出现故障。文献[4]采用递归神经网络构造智能传感器系统,对传感器故障进行检测、分离和恢复。

3.1.2 应用神经网络作为动态模型进行数据恢复

若检测到某个传感器出现故障,数据恢复神

神经网络根据其它正常传感器的输出可以给出故障传感器输出的估计值。

例如在某次液氧/煤油发动机试车过程中，E

型温度传感器测量数据不正确，利用BP神经网络得到参数的估计值，能够用来正确评价发动机的性能，见图1所示。

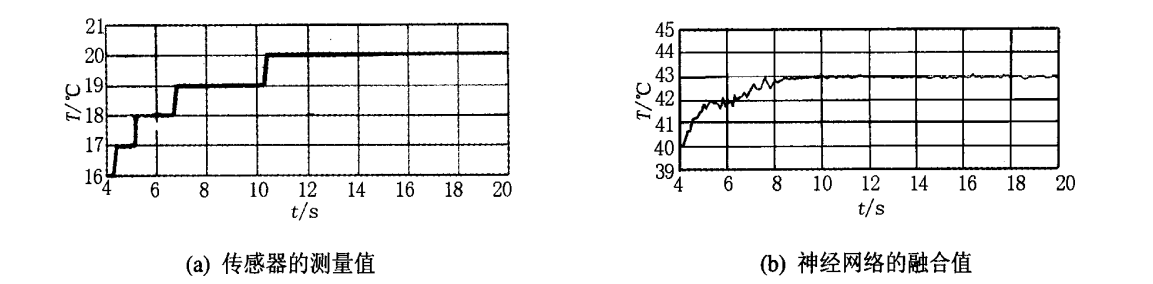


图1 应用神经网络对传感器信号进行估计

Fig.1 Signals predicted by neural network

基于神经网络的方法应用于传感器的故障诊断，其优点是显而易见的，即无需建立系统的数学模型、具有很强的鲁棒性等，在实际应用过程中应注意网络训练样本特征的提取，另外对网络的学习精度、稳定性、泛化能力等指标应进行必要的考察和检验。

3.2 基于神经网络和模糊推理融合的传感器故障诊断技术

从信息处理的角度看，神经网络与模糊推理技术之间存在许多共性，通过二者相互渗透和促

进形成神经网络—模糊推理融合系统，充分发挥了神经网络的模式识别、自适应学习能力和模糊推理对人的知识进行推理与决策的功能，成为较高级的智能系统，主要解决由于不精确性、不确定性以及噪声所引起的复杂问题。

自适应神经网络—模糊推理系统（ANFIS）是一个典型的融合系统，并得到广泛应用。ANFIS由前件和后件组成，与Sugeno模糊系统等效的一个两输入、单输出系统的ANFIS结构^[2,5]如图2所示。

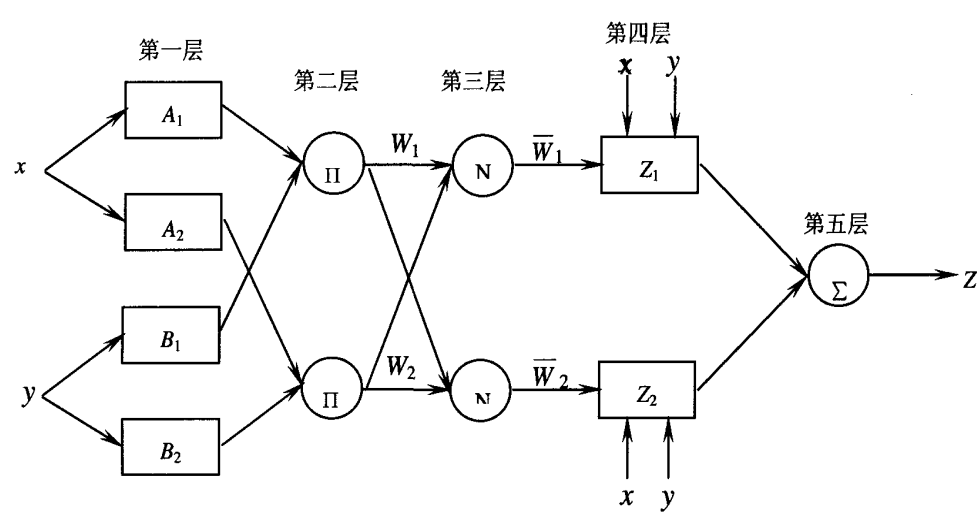


图2 Sugeno模糊系统等效的ANFIS结构

Fig.2 ANFIS structure equivalent to Sugeno fuzzy system

ANFIS 结构可以分为 5 层:

第一层: 计算输入的模糊隶属度。

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), i=1,2 \quad O_{1,i} = \mu_{B_{(i-2)}}(y), i=3,4$$

式中 $O_{1,i}$ 为模糊集 $A (=A_1, A_2, B_1, \text{ 或 } B_2)$ 的隶属度。

第二层: 计算每条规则的激励强度。

$$O_{2,i} = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y), i=1,2, \text{ 记作 } W_1、W_2。$$

第三层: 计算激励强度的归一化值。

$$O_{3,i} = \bar{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2}, i=1,2$$

第四层: 计算每条规则的输出。

$$O_{4,i} = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i (p_i x + q_i y + r_i)$$

式中 $\{p_i, q_i, r_i\}$ 为 i 节点的参数值。

第五层: 计算模糊系统的输出。

$$O_{5,1} = \sum \bar{W}_i f_i = \sum_i W_i f_i / \sum_i W_i$$

ANFIS结构的可调参数个数少, 并采用混合学习算法, 只要设计合理的ANFIS初始参数, 并覆盖整个输入空间, ANFIS能够很快收敛于反映系统动态特性的参数值。对3.1节中E型温度传感器测量数据不正确的情况, 采用ANFIS结构进行数据融合的结果如图3所示。

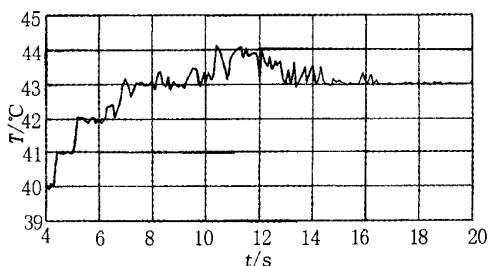


图3 利用ANFIS对传感器信号进行估值

Fig.3 Signal predicted by ANFIS

与 3.1 节中神经网络融合值相比较, ANFIS 结构的融合结果与发动机试验的实际情况更为接近; 从两种方法的计算过程来看, ANFIS 结构的学习训练时间更短。更为重要的是 ANFIS 由局部映射的模糊规则组成, 这些局部映射便于实施最小扰动原理, 即网络的自适应过程不仅要减少当前训练模式的输出误差, 而且对已学习过的响应产生最小扰动, 因而特别适宜于在线学习过程。

4 结论

综上所述, 基于人工智能的方法比其它方法具有独特的优越性, 决定了它在传感器故障诊断方面具有广阔的前景。然而, 由于基于人工智能的方法本身的理论研究尚不成熟以及传感器故障机理的研究也不是很深入, 所以尚有许多难题需要解决, 而且由于实际问题的复杂性, 不能寄希望于任何一种单一的方法就能解决所有故障诊断问题, 将基于数学模型方法、信号处理方法和人工智能方法有机结合起来应用到实践中, 产生的作用将是深远的。

参考文献:

- [1] 张洪钺, 闻新, 周露. 国内控制系统故障诊断技术的现状与展望[J]. 火力与指挥控制, 1997 (3).
- [2] 权太范. 信息融合——神经网络—模糊推理理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [3] 刘洪刚, 吴建军, 陈启智. 基于定性定量知识集成的液体火箭发动机故障诊断[J]. 航空动力学报, 2002, 17(3).
- [4] 刘勇, 沈毅, 胡恒章. 传感器故障检测、分离和恢复的神经网络方法[J]. 传感技术学报, 1999 (4).
- [5] 楼顺天, 胡昌华, 张伟. 基于MATLAB的系统分析与设计—模糊系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.

(编辑: 陈红霞)