

基于自联想网络的发动机传感器 解析余度技术*

南京航空航天大学
乌发航空技术大学

黄向华** 孙健国
依里亚索夫 华西里也夫

【摘要】 本文提出了一种基于自联想神经网络的传感器解析余度技术。在这种网络中, 冗余传感器的信息被压缩、重组进入网络的第一部分, 网络的第二部分将压缩信息恢复出来。基于数据融合原理, 若一个传感器发生故障, 其它传感器仍可提供足够的信息代替发生故障的传感器。理论分析和用于涡轴发动机的仿真结果表明, 这种特殊结构的自联想网络具有良好的过滤噪声和故障信号的作用, 特别适合于用作不易建模的复杂对象的传感器信号重构。

主题词: 航空发动机 传感器 神经网络 余度技术

分类号: V233.791

1 前 言

本文研究一种不基于对象模型的解析余度方法—自联想网络解析余度方法, 不需发动机的数学模型, 仅用被控对象的测量值作为网络输入即能诊断故障, 提供解析余度, 并具有在线学习功能。采用网络最优估计与故障诊断的综合逻辑, 能自动区分估计误差及传感器故障。

2 自联想网络的原理、结构及其特征提取与噪声滤波特性

自联想网络的基础是非线性主元素分析(Principal Component Analysis)原理, 主要用于将高维空间的数据映射到低维特征空间, 而信息损失量最小。利用神经网络强大的映射能力, 可将非线性主元素分析法中压缩与恢复的两个非线性函数用两个单隐层的神经网络实现, 并将两个网络串联起来, 如图 1 所示, 这样的网络称为自联想网络, 包含三层隐层: 映射层、瓶颈层和解映射层。网络输入为过程测量数据。自联想网络是一类

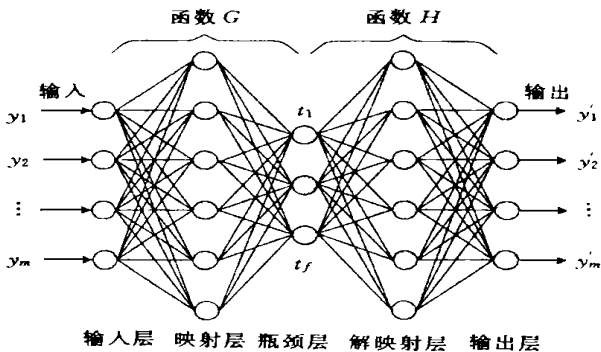


图 1 自联想网络的结构

1998 年 10 月第九届航空动力自动控制专业学术会议推荐文章; 1999 年 2 月收到修改稿。

* 本文系航空科学基金资助项目(编号: 97C52029)及中俄高校科技合作项目(编号: 中俄 96-3)

** 男 27 岁 博士 讲师 南京航空航天大学二系 210016

有着特殊拓扑结构的前馈神经网络, 其网络输入= 网络输出, 即输入输出映射为单位函数。自联想网络采用特定的内部结构, 使网络内部包含了限制因素, 防止网络直接简单地学习单位函数, 从而使自联想网络能过滤噪声, 消除测量误差的影响, 提供正确的测量值。

在自联想网络中, 引入了瓶颈层, 它的节点数 f 比输入(或输出)层的节点数 m 少。自联想网络将在输出层重构 m 维函数, 而在瓶颈层只用 f 个独立变量。瓶颈层迫使网络在映射层对输入进行编码和压缩, 经过瓶颈层由解映射层解码, 产生网络输出。网络调整权值和阈值, 使输入输出样本在最小平方和意义上最接近, 从而保证了训练好的网络最大限度地恢复经过瓶颈层压缩后的原始数据。本文采用了一种快速 Levenberg- Marquart 算法, 用于五层前向网络, 与 BP 算法相比, 收敛速度明显加快, 很适用于训练自联想网络的权值和偏置。

3 基于自联想网络传感器故障检测与重构

若经过各种故障样本的训练, 自联想网络在数据压缩过程中能除去各种故障传感器的故障信息, 输出与训练样本最接近的恢复数据。但由于故障样本要在发动机运行过程中出现故障后才能获得, 因此本文提出了用无故障样本来训练网络, 网络经过充分训练后, 就能用于传感器数据压缩—特征提取—重构输出估计值来检测传感器故障。

文献[1]采用最小平方和误差法作为故障检测、分离与适应逻辑来诊断传感器故障。它是以前网络输入输出向量均方误差最小来搜索故障传感器的。该方法对于事先不知道哪个传感器发生故障时, 需要对所有传感器可能输入值的范围内进行多维搜索, 当传感器数目较多时, 搜索速度很慢, 往往不能保证实时要求。本文提出一种故障诊断逻辑, 我们称之为估计值返回法。通过比较神经网络的输出与相应传感器的输出来诊断传感器故障。当某一变量估计值与传感器输出值之差超过预先设定的阈值时, 就检测出了传感器故障, 将网络输入与发生故障的传感器断开, 给网络输入前一时刻的估计值。该方法也可以检测多个传感器故障, 并提供正确的适应值, 只要正常传感器个数大于或等于瓶颈节点数。用前一时刻的传感器估计值也能估计出下一时刻的传感器值, 一方面是由于输入变量具有足够的冗余信息, 另一方面神经网络具有较强的容错性能, 当输入端有较小扰动时, 此扰动被分散到网络的各个节点上, 对输出的影响大大减弱。

4 自联想网络的最优估计与传感器故障诊断的综合逻辑

一般文献报导的自联想网络都假定传感器变量之间的关系在训练好后是准确的, 并以此关系为基准进行故障诊断并提供解析余度。实际上被控对象本身有安装制造公差或使用过程中的蜕化时, 自联想网络的最优估计也会引起残差。若不能区分是对象本身的蜕化等引起的残差还是传感器故障引起的残差, 则有可能把对象蜕化误警为传感器故障, 进行错误的故障适应或者把传感器故障误认为网络估计误差, 进行错误的修正。本文采用与文献[3]类似综合逻辑来使系统能自动区分残差是最优估计误差引起的还是传感器故障引起的。若是估计误差引起的, 便对神经网络在线补偿以减少以致消除误差, 若是传感器故障引起的, 则用相应的传感器的加权有效值代替故障传感器使系统平滑地过渡到自联想网络的最优估计以进行故障适应, 提供解析余度。

为实时修正网络, 本文提出一种在线补偿方案, 针对发动机可能发生的性能蜕化等不确定问题, 在故障诊断的过程中, 借鉴在线学习的神经网络的思想^[2], 对由于对象变化而引起的实际传感器输出与自联想网络的估计值之间的偏差进行在线补偿。

综上所述, 基于自联想网络解析冗余技术的系统工作原理如图 2 所示。考虑到用最小均方误差法检测传感器故障可能不能满足实时要求, 本文采用估计值返回法诊断传感器故障, 能获得较满意的结果。同时, 用故障样本训练是在确定不变的传感器基础上的训练, 考虑到对性能蜕化等的鲁棒性要求, 本文不再训练故障样本, 而是采取在线诊断和在线补偿的方法。

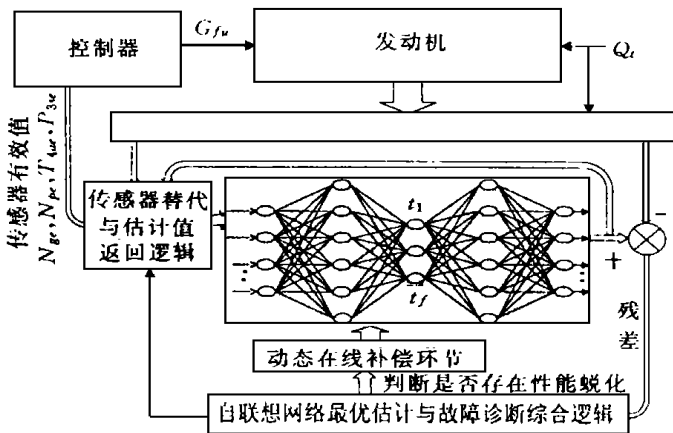


图 2 基于自联想网络的发动机控制系统解析冗余技术框图

5 数字仿真结果与分析

本文以某型涡轴发动机为对象, 用自联想网络对发动机传感器解析冗余技术进行了数字仿真研究。由于暂时没有足够的发动机试车数据, 本文所用的训练数据来源于部件级模型^[4]的动态数字仿真。网络的结构为 6-12-2-12-6 的自联想网络, 训练样本点为 84 个, 并采用相对换算参数。

训练后的网络放入控制系统中, 进行实时在线故障诊断。本文对各种稳态和动态点均进行了仿真, 限于篇幅, 仅列出功率为 0.5 的稳态功率点和功率从 0.15 到 1.0 的动态功率点的仿真结果。(图中横坐标均为时间(秒), 变量后缀: "s" 为传感器 "e" 为估计值 "a" 为真实值, N_g 为燃气发生器转速, N_p 为功率涡轮转速, T_{4a} 为燃气涡轮后总温, P_{3s} 为压气机出口总压, G_{fu} 为燃油流量, Q_e 为负载力矩)。

图 3 为多传感器故障诊断结果。从图中可以看到, 两个传感器故障时, 自联想网络能提供较好的估计值代替发生故障的传感器。

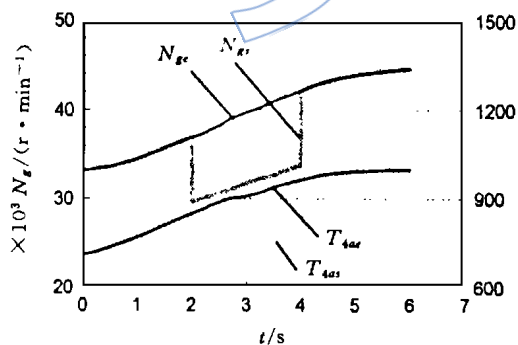


图 3 多传感器故障的故障诊断与适应

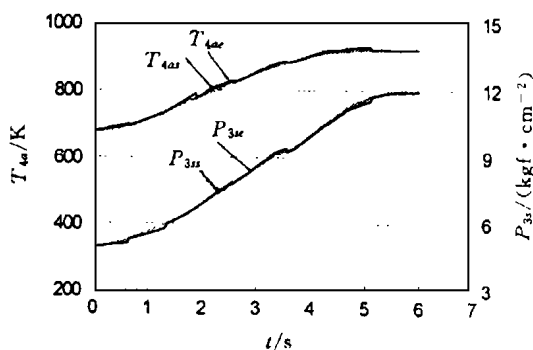


图 4 动态补偿的自联想网络的跟踪性能

图 4 和图 5 为压气机性能发生蜕化时, 具有动态补偿的与无动态补偿的自联想网络的输出跟踪性能比较。可见, 在有动态补偿时, 即使压气机性能发生蜕化时, 自联想网络仍具有十分卓越的输出跟踪性能, 而无动态补偿时, 估计值误差较大。

图 6 为发生软故障时, 具有动态补偿的自联想网络输出的估计值。从图中可以看到, 当传

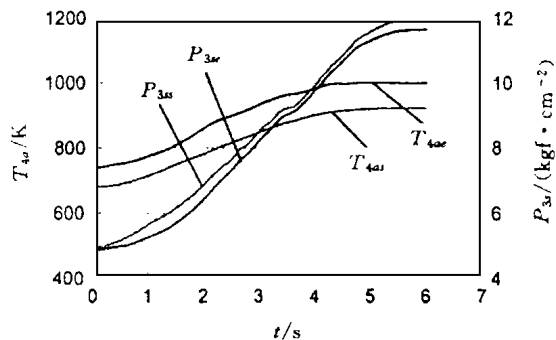
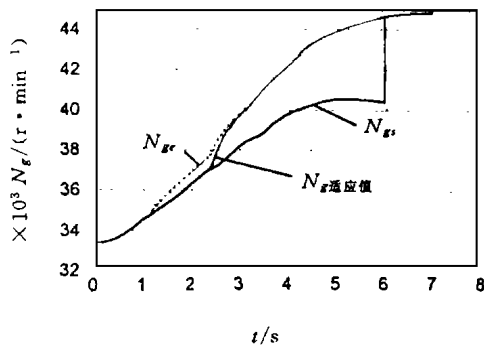


图 5 无动态补偿的自联想网络输出

图 6 N_g 软故障诊断结果

感器故障后, 传感器测量值与网络估计值之间的误差增大, 当误差超过故障阈值时, 故障确定发生, 故障适应值平缓地向估计值过渡。

6 结 论

本文提出一种自联想网络发动机传感器故障诊断方案, 将冗余传感器的信息压缩、重组到网络的瓶颈层, 在网络的第二部分将压缩的信息恢复出来, 以重构发生故障的传感器值。仿真结果表明, 自联想网络这种特有的结构使之具有特征提取与噪声滤波特性, 若经过故障样本的训练, 这种自联想网络还能过滤传感器故障。将这种自联想网络用于涡轴发动机传感器解析余度数字仿真研究表明有如下特点: (1) 只需要无故障样本对网络进行离线训练, 便能进行故障诊断; (2) 有良好的过滤噪声的能力; (3) 发动机性能蜕化时能自动对网络参数实时进行补偿修正, 并仍能准确诊断故障并实时提供解析余度; (4) 能区分传感器故障及网络估计误差, 从而能实时诊断软故障并提供解析余度。

参 考 文 献

- 1 Kramer M A. Nonlinear Principal Component Analysis Using Autoassociative Neural Networks. AICHE Journal, 1991, 37 (2): 233- 243
- 2 Huang Xianghua, Sun Jianguo. Artificial Neural Network Based Failure Diagnosis of Engine Control System. 97China-Russia Aeroengine Symposium
- 3 兰春贤, 孙健国. 基于部件跟踪滤波器的解析余度技术. 航空动力学报, 1994, 9(3):
- 4 盛雯. 涡轴发动机数控系统传感器解析余度研究: [硕士论文]. 南京航空航天大学, 1996

(责任编辑 王震华)

ANALYTICAL REDUNDANCY BASED ON AUTOASSOCIATIVE NEURAL NETWORK FOR AEROENGINE SENSORS

Huang Xianghua and Sun Jianguo

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

Ilyasov B. G. and Vasilyev V. I.

(UFA State Aviation Technical University)

ABSTRACT

Analytical redundancy technology based on autoassociative neural network is presented for aeroengine sensors. It doesn't depend on model and needs only the sample net of measurement data without sensor fault to train the network. Then it can work on-line. Estimation Feedback Scheme is developed and can meet the real-time requirements. If there has been performance degeneration of aeroengines, a compensation algorithm can be used automatically. Sensor fault analytical redundancy is accomplished by integrating the network estimation and fault detection logic. The results of theoretical analysis and simulation show that the provided scheme has the ability of distinguishing performance degeneration and sensor faults, and it also can detect soft faults of sensors.

Key Words Aeroengine Neural network Redundancy techniques

TECHNICAL NOTES

ROBUST INTEGRATED FLIGHT/PROPULSION CONTROL DESIGN FOR A STOL AIRCRAFT

Wang Tao and Meng Qingming

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

An application of robust LQG/LTR control design methodology to a centralized integrated flight/propulsion control (IFPC) system design for STOL/MTD aircraft is presented. The emphasis is put on formulating the Robust Servo LQR (RSLQR) control synthesis problem. A conversion parameter is introduced in controller design to improve the comparability of the system parameters. A detailed evaluation is completed for a controller obtained from RSLQR control design. The results indicate that a RSLQR control design meets the IFPC control system with thrust vectoring.

Key Words Aeroengines Vector control Nozzles

ADAPTIVE MODELLING TECHNIQUE FOR AEROENGINE

Duan Shoufu, Qi Wenkai, Gao Deping

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

ABSTRACT

An adaptive method for aeroengine modelling is introduced on the