

BPN 在涡扇发动机气路故障诊断中的应用

北京航空航天大学 孙 斌** 张 津
中国航空工业总公司第六〇六研究所 张绍基

【摘要】 本文应用误差反传网络(BPN)算法,研究发动机气路部件故障的定量诊断,并针对某型军用涡扇发动机的典型故障,给出了诊断结果,分析了测量系统的随机误差、发动机的不同工作状态、不同调节规律对诊断结果影响,结果表明BPN可成功地应用于发动机故障的定量诊断。

主题词: 航空发动机 网络 故障诊断

分类号: V 233.3 TP206.3

1 引言

近年来,随着发动机状态监视与故障诊断系统(EMS)的日益发展,对其气路部件故障的定量诊断能力的要求越来越高,传统的气路故障诊断法如气路参数分析法(GPA)等,依赖于发动机的数学模型,局限性较大,在测量参数较少时,仅能定性地把故障隔离到单元体,难于定量地分析各部件性能的变化^[1,2]。为满足此要求,一系列基于人工智能(AI)计算的故障诊断方法逐步得到了应用和发展,引人注目的主要有神经网络(ANN)算法等。本文以某型涡扇发动机为研究对象,采用典型的三层误差反传网络(BPN)对其在机载测量参数状态下气路故障的定量诊断进行了研究。

2 BPN 定量诊断的实现

BPN 即误差反传网络是一种前馈的、有导师学习的神经网络^[1],它由输入层、隐含层和输出层组成,通过改变各层间的连接权重,实现样本输入与输出间的映射关系。其算法比较容易实现,因此得到了广泛的应用。利用BPN 进行发动机的故障诊断,在此基础上发展成新的发动机的故障诊断方法,如美国 F-16 飞机上已采用BPN 进行发动机故障的定性诊断^[3]。

目前BPN 故障诊断方法主要是对发动机的稳态测量参数进行定性分析,把故障分类并隔离到单元体,能进行定量诊断的较少^[4~7]。但在实际工作中,不仅要了解发动机的故障模式,还要知道发动机故障的严重程度,以便更好地进行视情维修。因此,定量诊断发动机的故障十分必要。本文采用典型的三层BPN,实现发动机气路各部件故障的定量诊断。

2.1 网络的输入和输出和归一化处理

由于发动机气路各部件性能的变化,将引起测量参数的变化;反之,测量参数变化反映了发动机各部件性能的变化。因此,测量参数的不同变化趋势,将反映发动机不同气路部件性能

的变化,即不同的故障模式,利用BPN建立测量参数与发动机故障模式间的映射关系,便可确定发动机的故障。故本文选取表征测量参数不同变化趋势的发动机稳态测量参数值与基值的偏差为网络输入参数,取相对应的发动机故障模式为网络输出参数。

输入层节点数 9 个,为某型涡扇发动机机载测量参数值与其基值的偏差。包括:低压和高压换算转速偏差(ΔN_{1R})和(ΔN_{2R})、风扇内涵出口总压偏差(ΔP_{23})、风扇外涵出口静压偏差(ΔP_{s13})、压气机出口总压偏差(ΔP_{31})、涡轮排气压力偏差(ΔP_{65})、风扇外涵出口总温偏差(ΔT_{13})、涡轮排气温度偏差(ΔT_{65})、燃油总管压力偏差(ΔP_t)。

输出层节点数 11 个,为发动机可能发生的不同故障模式。包括:风扇和压气机效率下降量($\Delta \eta$)和($\Delta \eta$)、燃烧室效率下降率量($\Delta \eta$)、高、低压涡轮效率下降量($\Delta \eta_{it}$)和($\Delta \eta_{it}$);风扇和压气机流通能力的变化量(ΔW_{fR})和(ΔW_{dR})、高压和低压涡轮流通能力的变化量(ΔW_{ht})和(ΔW_{lt});外涵道压力损失的变化量($\Delta \sigma_{13}$)、燃油系统故障(ΔW_{fb})等。

隐含层节点数的选择是一个比较复杂的问题,目前还没有很好的理论公式来确定。隐含层节点数太少网络训练不易收敛,或训练出的网络容错性差;但隐含层节点数太多使网络的学习时间过长,误差也不一定最小,因此需要找一折中的隐含层节点数。本文通过多次试算,最后取隐含层节点数为 30。

由于神经元激励函数的饱和特性,要求输入样本的数量级不能太大;而神经元输出则在 $[0, 1]$ 区间内,因此要对实际样本的输入、输出进行归一化处理。

通常输入样本的归一化方法有线性的和非线性的两种,非线性的归一化方法(如采用 Sigmoid 函数)较适用于样本的分类,用于定量分析时丢失的样本信息较多,故本文采用线性的归一化法,把样本的输入归一化到 $[-1, +1]$ 内,设 $X_{\max}$ 和 $Y_{\max}$ 分别为实际样本输入、输出可能达到的最大绝对值,则归一化后样本的输入 X 为: $X = X / X_{\max}$ 。同样,采用线性的归一化方法把输出样本归一化到 $[0, 1]$ 内,即: $Y = Y / Y_{\max}$ 。

2.2 故障样本的获得

故障样本的获得通常有两种方法,一是从实验数据中获得,一是由发动机数学模型得到。由于实验数据中不可能包括所有故障模式及其严重程度,所以建立能定量模拟各种故障的发动机数学模型是十分必要的。本文在已有的非线性数学模型基础上,发展了能够在不同调节规律下定量模拟所有待诊断故障的发动机故障模拟器,可根据不同的发动机状态,计算发动机存在各种故障时的各部件性能参数的变化,为BP网络提供了必要的学习样本。

为了达到定量诊断故障的目的,必须定量地对BP网络进行训练,这是实现定量诊断的关键。本文采用如下方法定量地组织各种故障模式的学习样本。

以风扇效率下降的故障模式为例,考虑发动机气路部件故障形成的逐渐性,故障模拟器的计算误差、测量系统的误差,选取地面不加力状态、 $N_2 = 100\%$ 、风扇效率下降 2%, 3%, 4%, 5% 时,发动机模型计算出的测量参数值与基值的偏差值作为学习样本的输入向量,同时学习样本输出向量的主元素也定量地表示为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 其他元素为 0.0。依此类推,得到其他故障的训练样本,这样 11 个故障共有 44 个训练样本,学习精度为 0.1% 时,在 486 微机上的训练时间约为 2 小时。

2.3 诊断结果分析

为验证学习后的BPN故障诊断能力,同样定量选取校验样本。取故障变化量为 1.5%,

2.5%, 3.5%, 4.5% 时, 计算的测量参数与基值的偏差值作为校验样本的输入, 期望的输出向量的主元素值分别为 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 共有 44 个校验样本。表 1 是其中故障变化量为 3.5% 为例的校验样本的输入, 表 2 是对该校验样本的诊断结果。表 2 的各列表示 11 种不同的故障, 其顺序如各行所示的故障相同。

表 1 BPN 在故障变化量为 3.5% 时的校验样本($N_2 = \text{Const}$)

	ΔN_{1R}	ΔN_{2R}	ΔP_{23}	ΔP_{s13}	ΔP_{31}	ΔP_{65}	ΔT_{13}	ΔT_{65}	ΔP_t
$\Delta \eta$	- 0.355	0.00	- 0.207	- 0.261	- 0.278	- 0.219	- 0.007	0.001	- 0.111
$\Delta \eta$	0.002	0.00	0.108	0.144	0.042	0.108	0.105	0.185	0.189
$\Delta \eta$	0.042	0.00	0.057	0.072	0.063	0.060	0.060	0.068	0.165
$\Delta \eta_t$	0.300	0.00	0.366	0.432	0.437	0.372	0.364	0.398	0.480
$\Delta \eta_t$	- 0.167	0.00	- 0.054	- 0.108	0.002	- 0.054	- 0.106	0.084	0.033
ΔW_{FR}	0.207	0.00	- 0.180	- 0.225	- 0.248	- 0.192	0.004	0.000	- 0.099
ΔW_{CR}	- 0.352	0.00	- 0.282	- 0.309	- 0.510	- 0.306	- 0.275	- 0.151	- 0.264
ΔW_{ht}	0.202	0.00	0.204	0.237	- 0.408	0.210	0.208	0.198	0.246
ΔW_{lt}	- 0.605	0.00	- 0.489	- 0.654	- 0.509	- 0.498	- 0.556	- 0.231	- 0.408
$\Delta \sigma_3$	- 0.073	0.00	0.285	0.231	0.081	- 0.036	0.159	0.044	0.015
ΔW_{fb}	- 0.193	- 0.57	- 0.159	- 0.174	- 0.277	- 0.171	- 0.151	- 0.089	- 0.150

表 2 BPN 对故障变化量为 3.5% 时的校验样本的诊断结果

$\Delta \eta$	0.6846	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002
$\Delta \eta$	0.0000	0.6982	0.0000	0.0032	0.0001	0.0000	0.0000	0.0018	0.0000	0.0005	0.0000
$\Delta \eta$	0.0000	0.0021	0.7103	0.0010	0.0168	0.0017	0.0004	0.0011	0.0000	0.0040	0.0011
$\Delta \eta_t$	0.0000	0.0030	0.0000	0.7018	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002
$\Delta \eta_t$	0.0010	0.0015	0.0024	0.0001	0.7508	0.0008	0.0003	0.0000	0.0018	0.0002	0.0023
ΔW_{FR}	0.0000	0.0000	0.0008	0.0000	0.0000	0.6804	0.0036	0.0005	0.0013	0.0000	0.0005
ΔW_{CR}	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.6962	0.0006	0.0014	0.0004	0.0001
ΔW_{ht}	0.0004	0.0007	0.0000	0.0005	0.0000	0.0009	0.0001	0.7043	0.0000	0.0003	0.0001
ΔW_{lt}	0.0000	0.0000	0.0010	0.0000	0.0001	0.0011	0.0011	0.0000	0.7039	0.0001	0.0002
$\Delta \sigma_3$	0.0001	0.0004	0.0000	0.0018	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0000	0.6957	0.0010
ΔW_{fb}	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0005	0.0001	0.0007	0.0009	0.7198

定义 $E_P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |E_{pk}|$ 来表示 BPN 诊断的精确程度, E_P 越小, 网络的计算精度越高, 推广能力越强。表 2 中校验样本的 $E_P = 0.0004$, 故障变化量为 1.5%, 2.5% 和 4.5% 时的 E_P 分别为: 0.0013, 0.0007 和 0.0003, 由此可以看出, BPN 基本达到了定量诊断的目的。

为验证训练后 BPN 容错能力, 在原有校验样本输入参数的基础上, 增加了随机误差的影响, 当故障变化量为 3.5%、且存在测量系统随机误差时, 校验样本诊断结果的 $E_P = 0.003$, 虽然比原 E_P 增大了一个数量级, 但其结果仍能满足定量诊断的要求。

同时, 由于军用发动机状态多变, 还须考虑训练好的网络对发动机不同工作状态的适应能

力。为此,分别对地面不加力状态、 N_2 为 98%, 95% 和 90%, 故障变化量为 3.5% 时的校验样本, 利用训练好 BPN 进行诊断。其 E_P 分别为 0.02, 0.023 和 0.05, 结果表明随着发动机的工作状态的偏离, 定量诊断的精度越来越低, 仅能满足定性隔离故障的要求。

此外, 由于某型军用涡扇发动机随着飞行状态的变化, 其调节规律亦随之变化, 如在地面起飞状态为 $N_2 =$ 常数, 而在 11 km 和 $Ma = 0.9$ 时为 $N_1 =$ 常数; 这将引起同一种故障的表现形式不同, 此时根据 $N_2 =$ 常数训练好的 BPN 已不再适用, 必须在 $N_1 =$ 常数的调节规律下, 按照 2.2 节所述方法组织学习样本, 重新训练一个新的网络。本文以 $H = 11$ km 和 $Ma = 0.9$ 的故障为学习样本, 训练一个新的 BPN, 用 $Ma = 0.8, 1.0$ 和 1.2 , 变化量为 3.5% 时的故障为校验样本, 该诊断结果的 E_P 分别 0.005, 0.007 和 0.035, 基本满足在该调节规律下定量诊断发动机故障的要求。

3 小结及展望

ANN 是一种新的故障模式识别方法, 本文通过定量地组织网络的学习样本, 利用 BPN 实现了对涡扇发动机典型的单一故障的定量诊断, 结果令人满意。从诊断结果还可以得出, 该网络对测量系统的随机误差具有较好的适应性, 对同一调节规律下发动机的不同工作状态也有一定的适应能力。同时, 为提高 BPN 的实用性, 还要根据发动机不同的调节规律, 建立不同的网络与之相适应。

但由于 BPN 本身的特点, 其自组织能力较差, 很难实现多故障并存时的定量分析, 如何组织故障的学习样本, 以尽可能简单的网络结构实现多故障并存时的定量分析, 将是今后工作的重点。

参 考 文 献

- 1 Susan J T. An Overview of U S A F Engine Diagnostic Systems A I A A 86- 1678
- 2 OH- KYU. Kwon Fault Detection and Diagnosis in Gas Turbine A S M E 90- GT- 339
- 3 McDuff R J, Simpson P K. An Investigation of Neural Networks for F- 16 Fault Diagnosis S P I E Vol 1294
- 4 Ali O J. An Artificial Neural Networks for Diagnosis Gas Turbine P N L - S A - 22914
- 5 Long T W. Computing Engine Efficiencies by Neural Networks A S M E 95- GT- 157
- 6 Torella G. Utilization of Neural Networks for Gas Turbine Engine I S A B E 95- 7023
- 7 Fichard Eustace. Fault Diagnosis of Fleet Engine Using Neural Network I S A B E 95- 7085

(责任编辑 王震华)

and flexibility of pulse gel propellant rocket motor for thrust control and multiple- start have been preliminarily verified

Key Words Experiments Pulse Rocket engines Propellants

AN IN- FLIGHT ADAPTIVE MODEL OF TURBOFAN

Li Songlin, Sun Jianguo, Huang Jinquan

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

Li Jianming (Gas Turbine Institute, Xindu, Sichuan 610500)

ABSTRACT A real time adaptive model for turbofan engine is developed, which uses Kalman Filter concept to estimate unmeasured output variables and characterizes the effects of off- nominal engine behavior as biases on the measurable output variables. An adaptive engine model is formulated and its block diagram is set up with this method. The estimates of the output variables obtained from the presented model are compared with nonlinear simulation results of the engine for testifying its adaptability to the off- nominal behavior of the engine with deteriorated performance.

Key Words Turbofan engine Kalman filter Adaptive control Modeling

A NEW FAULT DIAGNOSIS METHOD BASED ON NEURAL NETWORKS AND EXPERT SYSTEM

Li Zhan sheng and Zhang Xin jiang

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

ABSTRACT In order to diagnose the faults in trubomachinery, a new type of diagnosis system based on Expert System (ES) and Neural Network (NN) is proposed. The NN diagnosis system is used to remember directly and associate faults happened before. The NN diagnosis system gives a set of candidate faults. The back reasoning mechanism of the expert system is applied to verifying these candidate faults. This diagnosis method is proved to be reliable and superior to the traditional ones.

Key Words Neural network Expert system Fault diagnosis

TECHNICAL NOTES

APPLICATION OF BPN TO QUANTITATIVE DIAGNOSIS OF GAS PATH COMPONENT FAULTS IN TURBOFAN

Sun Bin and Zhang Jin

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

Zhang Shaoji (Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang)

ABSTRACT The possibility of using BPN to quantitative diagnosis of turbofan

engine gas path component faults is investigated. By organizing the fault samples quantitatively, the construction of BPN is built and applied to the fault diagnosis of a low bypass ratio turbofan engine. The diagnostic results show that BPN can not only isolate the gas path component faults, but also identify the severity of component performance deterioration. It is proved that the BPN is adaptive to random errors in measure system and different engine operation regimes for a control plan. But the construction of BPN must be rebuilt under the condition of different engine control plans. Because it has a little ability of self-organization, it is difficult for BPN to isolate the engine faults quantitatively when several faults occur at the same time.

Key Words Aircraft engine Network Fault diagnosis

DYNAMIC SIMULATION OF AVIATION HIGH- SPEED ROLLER BEARINGS WITH SURFACE ROUGHNESS EFFECT

Chen Guoding, Li Jianhua, Zhang Chenglie

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

ABSTRACT A new dynamic analysis method for high-speed roller bearings is put forward by coupling dynamic theory of high-speed roller bearing with Partial Elastohydrodynamic Lubrication (PEHL) theory. With taking the surface roughness effects of bearing components into consideration, the dynamic characteristics of high-speed roller bearings are analysed in detail. The results indicate that the surface roughness and surface roughness texture of bearing component exert a considerable influence on the dynamic characteristics of the high-speed roller bearings. The improvement of the surface manufacturing quality of the bearing components can suppress the dynamic instability of bearing components in operation. Our experimental work verifies not only our analysis, but also the conclusion made by Averbach^[1] that high-speed roller bearings operate in mixture lubrication state.

Key Words High-speed bearing Roughness effect Dynamic analysis

RESIDUAL VIBRATION FATIGUE LIFE OF COMPRESSOR BLADE DAMAGED BY FOREIGN OBJECT

Kang Jidong, Chen Shixuan, Xu Zhihua

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

ABSTRACT The residual vibration fatigue life of TC4 plate blade subjected to Foreign Object Damaged (FOD) is investigated by means of eddy current excited vibration fatigue tests. The results show that the extent of FOD depends on both impact energy E and geometric scale S . There exists a critical damage for a given blades. Repairing of the damaged parts and lowering of the vibration stress in the blade are effective measures to improve the resistance of the blade to FOD. Moreover, the comparison of the titanium and steel blades indicates that the excessive fatigue strength of the steel blade is more than that of the titanium