

基于故障检测的某涡扇发动机维修决策方法

张莹松^{1,2}, 吴 灿², 唐海龙¹, 林 军², 郝 明²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国人民解放军第 5713 工厂 技术与培训中心, 湖北 襄阳 441000)

摘 要: 为有效解决某涡扇发动机过度维修造成发动机性能衰减、维修周期长、维修成本高的难题,以某涡扇发动机大修手册和维修工艺为依据,研究了基于故障检测的发动机维修流程和修理模式,建立专家诊断系统和基于 BP(back propagation)神经网络的故障诊断模型,并用数台涡扇发动机真实性能数据验证故障诊断模型的可靠性,其诊断准确率高达 95%,综合两者的诊断信息,制定可靠的维修方案,优化维修流程,提出了一种基于故障检测的维修决策方法。通过某涡扇真实排气温度高发动机应用验证表明:所提出的维修决策方法,有效排除故障,提高发动机的修理质量,降低维修成本,具有良好的工程应用价值。

关 键 词: 涡扇发动机; BP 神经网络; 专家系统; 故障检测; 维修决策

中图分类号: V267⁺.9

文献标志码: A

Maintenance decision method of a turbofan engine based on fault detection

ZHANG Ying-song^{1,2}, WU Can², TANG Hai-long¹,

LIN Jun², HAO Ming²

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Technology and Training Center, the 5713 Factory

the Chinese People's Liberation Army, Xiangyang Hubei 441000, China)

Abstract: In the maintenance process traditional excessive maintenance of turbofan engines may result in performance deterioration, long maintenance cycle and high maintenance cost. In order to solve this problem effectively, based on turbofan engine overhaul manual and maintenance technology, the fault detection process and repair mode were studied in depth, and the fault diagnosis expert system and fault diagnosis model were established based on BP (back propagation) neural network, verifying the reliability of fault diagnosis model with several sets of real performance data, with the diagnostic accuracy rate up to 95%. Secondly, the two kinds of diagnostic information were combined to develop reliable maintenance program and optimize the maintenance process. Then a maintenance decision method was put forward. By a certain type of turbofan real validation, it shows that this method can effectively eliminate the fault of high exhaust temperature, helping to improve maintenance quality and reduce maintenance cost of the engine.

Key words: turbofan engines; BP neural network; expert system; fault detection; maintenance decision

收稿日期: 2016-04-26

作者简介: 张莹松(1971—),女,高级工程师,硕士,主要从事航空装备修理研究。E-mail:779882316@qq.com.

引用格式: 张莹松,吴灿,唐海龙,等. 基于故障检测的某涡扇发动机维修决策方法[J]. 航空动力学报,2017,32(1):82-88. ZHANG Yinsong, WU Can, TANG Hailong, et al. Maintenance decision method of a turbofan engine based on fault detection[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 82-88.

航空修理工厂在某型涡扇发动机的修理过程中常遇到排气温度高、振动大、滑油消耗量大等技术故障,排除这些故障时常发生发动机过度维修情况,为其修理带来了困难.工厂目前依靠基于维修经验的排故方法已经不能满足该型发动机的修理技术要求,基于故障检测的维修决策技术为解决这些难题提供了可能^[1].实现基于故障检测的维修决策技术的关键是依据对发动机各部件监视信息,利用相关技术和维修经验加以综合分析,对发动机各部件的工作状态及其状态发展趋势得出合理的结论,为其维修提供可靠的依据,指导发动机维修^[2-3].因此,基于故障检测的维修决策技术对保障发动机的安全性和可靠性,具有重大的现实意义^[4].

近年来,涌现出了多种发动机维修决策方法,并在航空工业领域已有成功应用.文献[5]深入研究了视情维修决策要素与建模理论,给出了一种基于状态的民航发动机的维修决策方法,根据发动机当前状态,以故障强度为维修阈值决策发动机的拆换和送修时机,或以单位时间期望总维修费用最小标准下决策最优的预防性维修间隔.文献[6]从民用航空发动机视情维修特点入手,建立基于成本优化的维修决策模型方法和策略.文献[7]采用混合决策算法对航空发动机进行健康评估和维修调度,以实现最佳维修策略的目的,在此基础上,构建了基于 Web 的航空发动机维修决策原型系统平台,对涉及的健康评估和维修调度主要功能模块加以集成和实现.以上论述的维修决策方法是以发动机的维修时机、维修成本、维修资源的合理分配为结果导向的,其决策输出未导向发动机的维修措施,就发动机如何实现高效维修这一实际问题未做出详细说明.基于以上分析,本文给出了一种基于专家系统和 BP(back propagation)神经网络的维修决策方法,并将其应用在发动机的维修领域,综合两者的诊断信息,制定针对性的维修技术方案,优化发动机修理流程,提高发动机的维修质量,降低维修成本,以实现航空发动机可靠维修.

1 BP 神经网络故障诊断及专家系统推理诊断

1.1 BP 神经网络故障诊断

在发动机故障诊断中,主要利用发动机气路参数的偏差值开展故障诊断和性能监控工作,即发动机极限值与基线之间的相对偏差或绝对偏

差.基线是指针对发动机在出厂且性能良好阶段,特定飞行条件和运行环境下,气路参数分布随着工况参数变化而产生的平均变化关系^[8].诊断建模和应用中所采用的气路参数包括:高压转子转速(n_h)、低压转子转速(n_l),燃油流量(w_f),涡轮排气温度(t_5)和推力(F).实际计算过程是将气路参数工程值与发动机基线比较,获取构建样本空间所需的偏差量,参数采用绝对偏差值.故障诊断选择的神经网络为一个 5 进 4 出的结构,网络为 3 层结构,输入神经元数目和输出神经元数目分别为 5 和 4,选择隐含层数目为 8.因此网络拓扑结构为 5,8,4^[9-10].其中,输入是稳态的低压转子转速偏差值 Δn_l 、高压转子转速偏差值 Δn_h 、燃油流量偏差值 Δw_f 、涡轮排气温度偏差值 Δt_5 和推力偏差值 ΔF 归一化后的值;网络样本输出为依次为风扇效率下降 ΔE_{fan} 、压气机效率下降 ΔE_{hpc} 、高压涡轮效率下降 ΔE_{hpt} 、低压涡轮效率 ΔE_{lpt} 4 种性能参数变化量的程度值,可用集合 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 代表 4 种故障模式.神经网络的目标输出 $[0.9, 0.1, 0.1, 0.1]^T, [0.1, 0.9, 0.1, 0.1]^T, [0.1, 0.1, 0.9, 0.1]^T, [0.1, 0.1, 0.1, 0.9]^T$, 归一化的公式为 $y = 1/(1 + e^{-x})$ ^[11].由于当前没有实际可用的故障样本数据,神经网络训练样本由发动机非线性模型模拟得到.系统首先通过发动机非线性模型模拟风扇效率下降 ΔE_{fan} 、压气机效率下降 ΔE_{hpc} 、高压涡轮效率下降 ΔE_{hpt} 、低压涡轮效率下降 ΔE_{lpt} 等 4 种性能参数分别变化 1%~6%,以 1%为间隔,得到高压转子转速 n_h 、低压转子转速 n_l 、燃油流量 w_f 、涡轮排气温度 t_5 和推力 F 的故障稳态值,加上一组发动机未发生故障时的 n_h, n_l, w_f, t_5 和 F 正常稳态值,求出每种故障与正常稳态值的偏差值.对于发动机每种故障模式分别选用 80 组样本作为网络训练数据,40 组作为测试数据,用于网络的测试,网络测试结果如表 1 所示.从输出结果看到,40 个测试样本中,有 2 个样本出现误诊,故障诊断准确率为 95%.

1.2 基于故障树的专家系统推理诊断

专家系统是一个交互式的计算机决策工具,利用专家经验知识来解决复杂问题的决策专家,其基本原理是将专家拥有的知识存储为计算机中的知识,模拟专家的思维方式,通过一系列推理得到决策结论,并给出每一个推理过程的正确解释^[12].

本论文将获取到的某型涡扇发动机排气温

度高故障情况通过专家的经验知识去分析顶事件是如何发生的,再以顶事件为起点分析每层事件发生的过程及原因,一直分析到基本的底事件为止,通过每层事件发生的逻辑关系,运用逻辑门将所有事件连接起来形成排气温度高故障树^[13]. 故

障树与专家系统的关系为故障树的顶事件与专家系统的目标任务相对应,其底事件与专家系统的推理结果相对应,而故障树由顶到底的层次和逻辑关系对应于专家系统的推理过程. 某涡扇发动机排气温度高故障树见图 1.

表 1 BP 神经网络测试结果
Table 1 Test results of BP neural network

测试样本	参数 $\{n_h/\%,n_l/\%,w_l/(\text{kg/h}),t_5/^\circ\text{C},F/\text{kN}\}$	网络输出	诊断结果/实际结果
样本 1	(107.1,92.3,969,623,16.254)	(0.9004,0.1000,0.0985,0.0999)	A_1/A_1
样本 2	(105.7,92.3,909,650,14.725)	(0.8981,0.1001,0.0976,0.1000)	A_1/A_1
样本 3	(107,96,1038,622,16.89)	(0.8995,0.1035,0.0986,0.1042)	A_1/A_1
样本 4	(106.7,94,968,610,16.583)	(0.9022,0.1006,0.1008,0.0985)	A_1/A_1
⋮	⋮	⋮	⋮
样本 37	(105.8,93.7,1024,635,16.359)	(0.0998,0.0998,0.1000,0.8993)	A_1/A_4
样本 38	(106.8,94.5,979,623,16.874)	(0.1001,0.0998,0.1000,0.8997)	A_1/A_4
样本 39	(106.5,94.8,1037,638,16.99)	(0.1003,0.0998,0.8998,0.1000)	A_3/A_4
样本 40	(106.3,93.6,952,641,16.531)	(0.1001,0.1013,0.0985,0.8231)	A_1/A_4

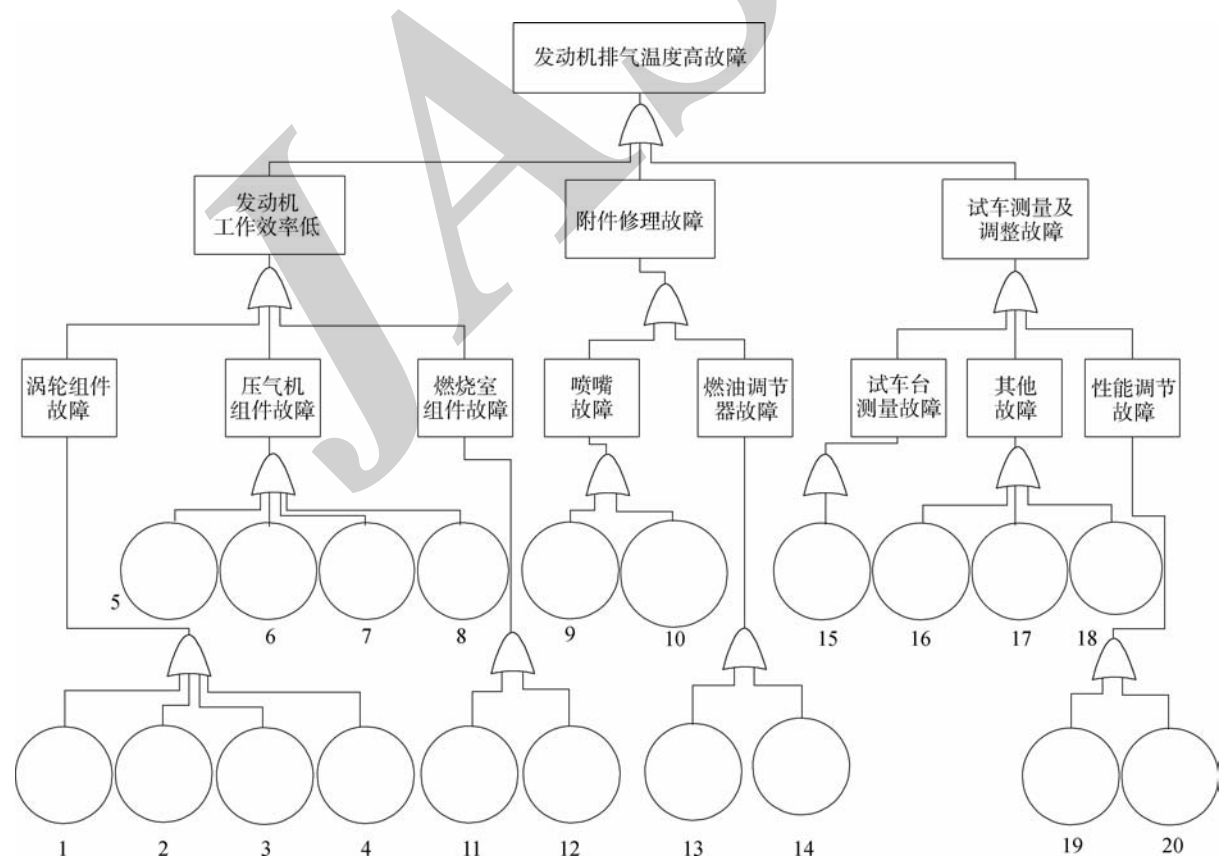


图 1 某涡扇发动机排气温度高故障树
Fig. 1 High exhaust temperature fault tree of a turbofan engine

对于发动机确定性故障征兆,本系统模拟专家的实际经验和思维方式,依据诊断知识库的知识,按照正向推理和反向推理相结合的策略进行逐步推理,进而得出诊断结论.专家系统诊断原理如图 2 所示.该系统将故障现象、故障模式、故障原因以故障树的形式组织起来构成诊断知识库,正向和反向推理机制形成系统的推理规则,当发动机的故障征兆信息(顶事件)输入专家系统时,系统选取知识库中的相对应的故障树,根据专家经验知识,判断故障树节点的重要度,确定故障树各事件的优先级,然后按照优先级进行正向推理,得到对应的故障模式(底事件).

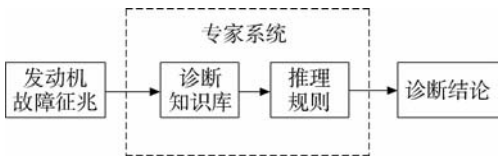


图 2 专家系统诊断原理

Fig. 2 Diagnosis principle of expert system

2 基于故障检测的维修决策方法研究

2.1 基于故障检测的维修流程改进

基于故障检测的修理模式是依托先进的测量检测仪器、设备、工装,运用各种检测技术和分析方法,监测发动机的潜在故障,有针对性的进行装备修理,最终实现发动机全寿命、全要素、全状态、精准高效的修理保障^[14].而发动机的维修流程是其修理模式的具体体现,基于故障检测的维修流程是以故障检测为基础,依据发动机大修手册和工艺规程制定的整套维修过程环节,包含发动机送修进厂到修理合格出厂所有维修过程,所有的

流程都是闭环的,有利于发动机返厂检查时发现问题,进而及时整改问题,保证发动机的维修质量可控^[15].

本论文在原来的维修流程基础上,融入故障诊断模型和专家系统这两种故障检测工序,将两者的诊断信息转化为故障检测信息,指导发动机维修,制定了改进的故障检测维修流程.未使用完一个寿命周期,出现故障返厂维修的发动机(返修机)上试车台复试性能,记录试验数据及相关故障信息,并将相关故障信息传递专职故障检测人员进行针对性故障检测.故障检测结束后,针对需修理的机件,由修理人员进行针对性修理,合格后提交检验确认,最后经故障检测人员确认闭环.而大修机在使用完一个寿命周期后性能衰减厉害,为保证其安全性直接进入全分解工序,即发动机所有单元体、部附件流入故障检测工序,按大修手册和维修工艺由修理人员实施通用修理.

图 3 的虚线部分为维修流程的改进部分,改进前,所有发动机进入全分解工序,实施通用修理,而在改进的维修流程中,返修机在维修前加入了故障诊断模型和专家系统诊断工序,然后再进入部分分解工序,实施针对性的维修.为了提高发动机维修的可靠性,弥补单一诊断模型可能失效的局限性,发动机故障检测须综合两者的诊断信息,从而保证了故障检测信息的全面性和准确性,制定可靠的维修方案,实现发动机的高效维修^[16].

2.2 常规维修措施的固化和实施

根据某涡扇发动机大修手册和工艺规程等技术文件的规定,制定了涡扇发动机排气温度高的通用维修措施和维修方案.其通用的主要措施如下:

- 1) 提高 3,5 级放气活门密封性;

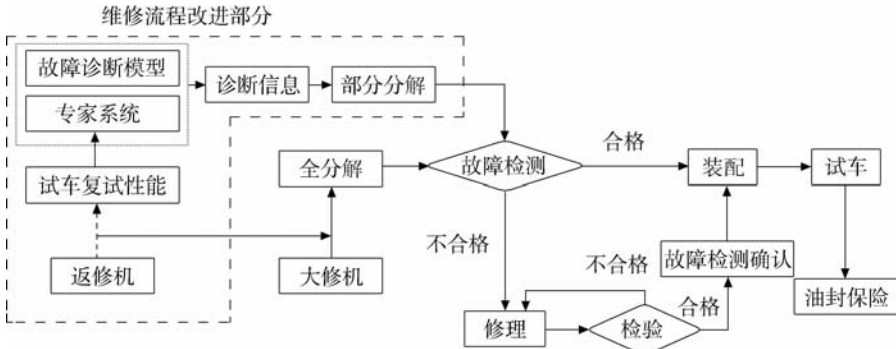


图 3 改进的发动机故障检测维修流程

Fig. 3 Improved fault detection maintenance process

2) 对发动机风扇、压气机的转、静子叶片、可调导向叶片、高压导向器叶片、整流器进行振动光饰,减少空气流道损失;

3) 控制压气机转子叶片与工作环的径向间隙,保证径向间隙为下限值;控制风扇转子、压气机转子的封严篦齿与整流器的径向间隙,保证径向间隙为下限值;

4) 改进封严涂层质量;

5) 对燃烧室机匣和高压涡轮导向器内、外机匣进行荧光检查,降低漏气的可能性;

6) 检查并改善工作喷嘴工作状态;

7) 增大涡轮空气流量,提高涡轮效率. 严格控制高压涡轮导向器面积在 $145\sim 148\text{ cm}^2$ 范围内;依据某涡扇发动机修理要求,对各级导向器叶片外缘板喷涂封严涂层,控制其与各级涡轮工作叶片封严篦齿之间的径向间隙.

3 某真实涡扇发动机实际应用验证和效果分析

工厂承修的某涡扇发动机在厂内试车和外场使用中,因最大状态排气温度偏高而返工、返厂的现象时有发生. 发动机在外场地面面试车检查时,排气温度有超温的趋势(工艺规定实测值 t_5 不超过

$660\text{ }^\circ\text{C}$,换算值 t_{5b} 不超过 $620\text{ }^\circ\text{C}$)且通过降低转速等手段无效. 为攻关这一技术难题,本论文随机选取了 4 台排气温度高故障的涡扇发动机用于试验验证和效果分析,根据发动机的故障检测信息,运用故障诊断模型和专家系统对其进行故障诊断,以诊断信息为依据并结合工厂的维修经验,改进发动机的维修流程,制定针对性的维修方案,以实现发动机的精益维修. 4 台排气温度高涡扇发动机故障检测信息见表 2,表中 p_2 表示压气机后压力.

以 WS-2 发动机为例,其神经网络的诊断结论为高压涡轮效率下降,专家系统对 WS-2 发动机诊断的过程,引入故障检测手段,发动机上台复试性能录取相关性能参数,下台进入全分解工序,复测高压涡轮导向器面积为 151 cm^2 偏大,工艺规定范围为 $(145\sim 148\text{ cm}^2)$,低压一级涡轮导向面积为 440 cm^2 均不符合要求,而导向器面积是影响涡轮做功的重要因素之一,故专家系统给的诊断结论为涡轮组件故障,最后综合两者诊断信息,以高压涡轮和低压涡轮组件故障为依据,制定针对性的维修措施. 从表 3 和表 4 可以看出 4 台发动机经过针对性的维修后,其排气温度均出现了不同程度的下降,且在合格范围之内,说明维修措施有效,排除了故障.

表 2 发动机故障检测基本信息
Table 2 Basic information of engine fault detection

型号	故障检测信息	$n_h/\%$	$n_l/\%$	$w_T/(\text{kg/h})$	$t_5/^\circ\text{C}$	F/kN	$t_{5b}/^\circ\text{C}$
WS-1	$p_2=0.71\text{ MPa}$ 小于工艺规定值;压气机叶片进、排气边转接处不符合设计图样要求	105.1	92.3	1000	618	16.768	645
WS-2	高压涡轮导向器面积为 151 cm^2 , 低压一级涡轮导向面积为 440 cm^2 均不符合要求	104.6	89.6	851	656	13.39	646
WS-3	风扇转子封严篦齿与整流器的径向间隙不符合要求	106.6	93	992	634	16.24	630
WS-4	低压涡轮盘篦齿涂层有掉块现象	105.5	95.8	1017	631	16.177	629

表 3 发动机的维修决策信息统计
Table 3 Engine maintenance decision information statistics

型号	BP 神经网络诊断结果	BP 诊断结论	专家系统推理结论	维修措施
WS-1	(0.1002, 0.9424, 0.0036, 0.1000)	A2	压气机组件故障	1), 2), 3), 4), 6)
WS-2	(0.1000, 0.1013, 0.5396, 0.4672)	A3	涡轮组件故障	3), 4), 5), 6), 7)
WS-3	(0.9003, 0.1091, 0.1137, 0.1205)	A1	风扇组件故障	2), 3), 4), 6)
WS-4	(0.1588, 0.1077, 0.1138, 0.9077)	A4	低压涡轮组件故障	3), 5), 6), 7)

表 4 发动机维修后的数据
Table 4 Data after engine maintenance

型号	$n_h/\%$	$n_l/\%$	$w_l/(\text{kg/h})$	$t_5/^\circ\text{C}$	F/kN	$t_{5b}/^\circ\text{C}$	维修结论
WS-1	104.7%	93	976	582	16.863	609	合格
WS-2	106	93.2	945	593	16.365	590	合格
WS-3	104.7	91.2	968	561	16.967	596	合格
WS-4	106.5	92.4	909	606	14.799	553	合格

4 结 论

本文将故障诊断模型和专家系统应用到发动机的维修领域,综合两者的诊断信息,制定维修方案和措施,优化修理流程,实现了发动机全寿命、全要素、全状态、精准高效的修理保障.全文可得到以下结论:

- 1) BP 神经网络发挥了诊断实效,能准确定位发动机故障部位和故障类型,诊断率高达 95%;
- 2) 与传统依靠维修经验的维修方法相比,本文提出的维修决策方法制定了针对性较强的维修措施,减少不必要的维修环节,达到了缩短发动机的大修周期,降低维修成本的目的;
- 3) 基于故障检测的维修决策方法可推广应用用于其他型号发动机的维修领域,具有良好的工程应用前景.

参考文献:

[1] 向巧.航空发动机维修工程管理[M].北京:机械工业出版社,2013.

[2] Giorgio M, Guida M, Pulcini G, et al. A condition-based maintenance policy for deteriorating units:an application to the cylinder liners of marine engine[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry,2015,31(3):339-348.

[3] 张涛.装备使用阶段维修保障能力评估建模与分析[D].长沙:国防科学技术大学,2004.

ZHANG Tao. Modeling and analysis of maintenance support capability assessment of equipments in the usage phase [D]. Changsha: National University of Defense Technology,2004. (in Chinese)

[4] Urban L A. Parameter selection for multiple fault diagnostics of gas turbine engines[J]. Journal of Engineering for Power,1975,97(2):225-230.

[5] 戎翔.民航发动机健康管理中的寿命预测与维修决策方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.

RONG Xiang. Methods of life prediction and mainteance

decision making in civil aeroengine health management [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008. (in Chinese)

[6] 赵飞.民航发动机预知维修决策研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.

ZHAO Fei. Predictive maintenance decision research for civil aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2011. (in Chinese)

[7] 范凯.基于 Web 的航空发动机维修决策系统研究[D].沈阳:东北大学,2009.

FAN Kai. Research on Web-based aeroengine maintenance decision system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese)

[8] Volponi A J, de Pold H, Ganguli R, et al. The use of Kalman filter and neural network methodologies in gas turbine performance diagnostics: a comparative study[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2003,125(4): 917-924.

[9] 陈恬,叶志锋,孙健国,等.自组织神经网络航空发动机气路故障诊断[J].航空学报,2003,24(1):46-48.

CHEN Tian, YE Zhifeng, SUN Jianguo, et al. Self-organizing neural network based fault diagnosis for aeroengine gas path [J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2003,24(1):46-48. (in Chinese)

[10] 谭国平.基于 BP 神经网络的泵控马达系统故障诊断专家系统应用研究[D].南京:东南大学,2000.

TAN Guoping. Fault diagnosis expert system application research in pump-controlled motor system based on BP neural networks[D]. Nanjing:Southeast University,2000. (in Chinese)

[11] Jardine A K S, Lin D, Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2006,20(7):1483-1510.

[12] 金亮亮.基于故障树的航天器故障诊断专家系统研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.

JIN Liangliang. Study on spacecraft fault diagnosis expert system based on fault tree[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2008. (in Chinese)

[13] 宋红英.基于蚁群神经网络的发动机故障诊断专家系统研

究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.

SONG Hongying. Study on fault diagnosis expert system of engine based on ant colony-neural network[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinses)

[14] 梁剑. 基于成本优化的民用发动机的实情维修决策研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.

LIANG Jian. On-condition maintenance decision research of aero-engine based on cost optimization[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)

[15] 崔建国, 傅康毅, 陈希成, 等. 基于灰色模糊与层次分析的
多属性飞机维修决策方法[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 478-486.

CUI Jianguo, FU Kangyi, CHEN Xicheng, et al. Multiple attribute decision making of aircraft based on grey-fuzziness and analytical hierarchy process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 478-486. (in Chinese)

[16] Abedin M J, Imran A, Masjuki H H, et al. An overview on comparative engine performance and emission characteristics of different techniques involved in diesel engine as dual-fuel engine operation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60(2): 306-316.

(编辑: 王碧珺)