

关于航空发动机故障诊断技术的探究

唐晓辉

空装驻沈阳地区第二军事代表室 辽宁沈阳 110043

摘要: 鉴于航空发动机的工作条件严峻、工作强度庞大、工作环境恶劣等因素所影响, 发动机工作状态频繁变换, 其安全性、可靠性要求极高。航空发动机故障诊断技术, 不仅迅速判断航空发动机故障位置, 明确故障程度, 保障飞行安全, 精简维修投入, 也将以更为先进的维修思想、维修方式, 促进航空发动机得以可持续发展应用。为此, 本文特针对航空发动机故障诊断技术进行了深入探究。

关键词: 航空发动机; 故障诊断技术; 飞行安全

Research on aero engine fault diagnosis technology

Xiaohui Tang

The Second Military Representative Office of Air Cargo in Shenyang, Shenyang 110043, Liaoning, China

Abstract: Given the severe working conditions, high work intensity, and harsh working environment of aircraft engines, the frequent changes in their working status demand high levels of safety and reliability. Aircraft engine fault diagnosis technology not only quickly identifies the location and degree of faults, ensuring flight safety and reducing maintenance costs, but also promotes the sustainable development and application of aircraft engines with more advanced maintenance concepts and methods. Therefore, this paper conducts an in-depth exploration of aircraft engine fault diagnosis technology.

Keywords: Aeroengine; Fault diagnosis technology; Flight safety

航空发动机在其制作方面的工艺材料、后期应用方面维护管理等成本高昂, 因此对其经济性要求较高。飞行故障问题中, 发动机故障比重极大, 且常常由于发动机故障问题引发飞行灾难性事故, 为此常规的飞机维修过程中, 发动机维修成本更是巨大, 将占据该航空器整体维修成本的 50% 以上。为此, 为了促使航空发动机得以高效稳定运行, 最大程度精简维修成本, 就必须深入了解发动机实际运行情况, 掌握变化规律, 实时监控并有效诊断其故障问题。

一、航空发动机模型解析故障诊断方法

航空发动机模型系统解析方法, 则是将其航空发动机相关可测信息通过模型表达方式, 予以信息比较, 产生残差, 从而分析、处理残差, 实现故障有效诊断。该方法研究最为系统、发展最早的故障诊断方法。它需要针对被诊断对象的实际情况, 建立起精确数学模型。优势在于将充分运用该系统内部深层知识, 以此方便系统故障诊断。缺点在于, 难以获取更为系统全面的模型, 且由于噪声、扰动、误差导致建模出现问题, 致使鲁棒问题突出。一般来讲, 模型解析故障诊断主要历经产生残差、评价残差两个阶段。依据所差生残差的不同形式, 该方法即可细分为参数估计法、等价空间法、状态估计法。

(一) 参数估计法

参数估计法, 则是依据航空发动机相关参数变化进

行特性统计, 从而开展故障监测和诊断活动。航空发动机的故障问题同过程参数之间会建立起一种精确联系, 从而该方法将在远着呢山更有利于分离故障问题。但是, 应用该方法处理航空发动机故障时, 需构建起更为精确系统的数学模型, 同时精确参数确立适用方法, 并选择适合的过程性参数, 必要时可选用统计决策方法, 被控过程予以足够激励等等。航空发动机故障确定应用该方法的困难点在于建立起的数学模型精确度问题, 可能会出现相关故障参数及数量不对等的问题。

(二) 等价空间法

等价空间法, 即是通过系统输入、输出实际测量值进行数学模型一致性问题的系统检验, 以此方式将更科学检测、精确分离故障问题。航空发动机故障确定应该该方法时, 需通过发动机的故障样本对其非线性模型予以适当优化绣花, 即使是针对其中某一特定故障类型, 也需依据其不同故障状态予以优化修正, 因此需获取相对应的不同故障样本, 操作起来较为困难。

(三) 状态估计法

航空发动机被控过程状态将直接反射出该系统实际运行状态。依托所估计系统状态, 综合相关模型即可完成科学监测、有效诊断。首先, 将对其被控过程状态重构表现出来, 以此循序构成残差序列。相关的残差序列中, 将包含各种各样的故障信息。在其残差序列基础上, 构造出适当模型, 通过统计检测方法, 将航空发动

机故障问题予以一步步分离、估计、决策。一般即可采取各种观测器、滤波器来估计实际状态。该方法主要历经生成残差、测试统计、决策分析的三个过程。鉴于航空发动机相关数学模型工作过程复杂性、非线性、高维性特点,虽然自动控制理论方面提出更为丰富性能的滤波器、状态观测器,但是由于计算机系统的不稳定性、复杂性特点,在实际应用至发动机系统中,仍然存在诸多阻力困难^[1]。

二、航空发动机信号处理故障诊断技术

如若所传达数据信息是以时间作为自变量连续性函数,即可称之为信号。信号一般作为信息的主要载体,是其信息主要的物理表现形式,更是信息表现函数。航空发动机信号处理方面的故障诊断技术核心思想在于:依托信号分析理论,即可获取系统频域、时域中更深层次、多种特征的向量,通过这种向量同系统故障源间关系进行故障源位置的初步判断。此方法一般在难以建立诊断对象解析模型时适用。航空发动机信号处理故障诊断技术方法如下。

(一) 直接进行系统输入、输出的测量

一般情况下,所控制范围内的输入、输出均在正常合理范围内发生变动,如若超出其范围标准,即可认定为该故障将要发生或是已经发生。除此之外,亦可将其输入输出量实际变化率予以精细化检测,判断其是否满足要求来确定故障是否发生。该方法,常被常志伟门限检测,工程建设中最为实用。依据航空发动机关键参数或是实际特征进行门限检测,即可及时发现发动机相关部件的异常情况。鉴于随机干扰及诸多瞬间过程存在现象,致使该方法用于故障检测方面,其准确性、及时性存在一定偏差,同时,门限值确定也较为困难复杂。

(二) 信息多项融合方法

20世纪70年代就已经出现了一些多传感器信息综合的相关概念、名词。并在日后较长的时期内,人们也更广泛应用“数据融合”相关概念。但是自20世纪90年代开始,“信息融合”相关概念就深受广泛应用。无论是信息融合,还是数据融合都是通过计算机技术依据一定时序获取相关传感器观测信息,从而在一定标准下将其予以自动化系统分析、综合性处理,实现航空器故障问题的有效决策。信息融合将对来自于某一目标体的多元信息数据予以智能化融合,从而产生出相比与单一信息源更为精准、系统、全面的决策,从而对航空器复杂系统予以更精准诊断^[2]。

(三) Kullback 信息准则进行故障检测

通过 Kullback 信息准则来判断系统的变化情况,如若存在未建模动态特征时,将其同阈值予以比较,从而实现更科学的故障监测。首先,将依据 Goodwin 随机嵌入方法,将其未建模动态特性用作为软界估计,再通过梯度方法、遗传算法将系统软界、参数清晰辨识,并在 Kullback 信息准则中适当引入全新指标评价用作为未建

模动态特性,并科学设置阈值,探寻更科学适合的决策方案,在其未建模动态特性并未存时期同阈值进行比较,以此方式,将更科学监测航空发动机鲁棒故障检测。但是,如若存在未建模动态特性,则相应的 KDI 波动则会很大,也就不再适用阈值检验方法。

(四) 自适应滑动窗格形滤波器故障检测

滑动窗格内系统的输入输出数据,通过自适应格形滤波器自动生成残差序列。如若该飞行系统是无故障,处于正常状态,则相关的残差序列则是将其零均值固定于方差内的高斯过程。如若系统存在故障问题,则会由其故障引发一系列的过渡过程,从而导致相关的残差序列方差或是均值发生系列变化。依托构造科学合理的检验统计量,将对其残差序列予以假设检验,且无需系统构建准确数学模型具备先验知识,即可精准及时的在线检测处该系统的故障问题、

(五) 小波变换故障诊断监测技术

小波分析法最早是法国科学家莫莱特进行地震信号分析时所提出的有效分析信号视频特征的方法,是应用数学的重要分支。历经十余年发展实践,小波变换的相关理论、应用方法、技术等各个方面均实现极大进步。小波分析将显著改善傅里叶分析法中只可获得信号整体频谱,仅对稳态信号予以分析,并不能多所获信号局部特征、非稳态信号局部分析的弊端。小波变换故障诊断在航空发动机故障诊断时,将对发动机发射信号予以小波变换,所变换信号自动去除由其输入变化所导致的奇异点问题,剩下的奇异点则用作为系统发生故障点^[3]。

三、航空发动机的智能故障诊断分析方法 - 神经网络技术

当前时代,故障诊断分析已经具备一定的 AI 特点,通过对智能故障诊断的系统研究,将同知识探寻提高航空发动机系统的智能化诊断准确率。因此其智能化程度悉数表现于诊断过程中,数学模型同系统间的系列问题本质性逼近程度,及再现领域专家知识,均是仍能够同其他学科理论、技术在其故障诊断过程中的综合性体现。为实现更综合性概述,智能故障诊断方法中,特以神经网络技术为案例进行系列研究。

(一) 神经网络法

神经网络法是有效的信息处理方法,将对单元组成的非线性自适应动力系统予以大规模处理,兼具计算、记忆、学习、智能处理功能,在不同层次、不同程度上积极模仿人脑神经系统信息处理的不同方式、检索功能、存储性能。近些年,深受广泛重视、深入研究。鉴于该方法将传统识别模式三个步骤系统结合起来,形成一种并不完全透明状态的非线性映射,因此又可能实现自适应模式的识别,显著解决传统模式识别中各种自学习系列问题。鉴于神经网络功能特点,将直接适用于航空发动机系统检测及故障诊断^[4]。

(二) BP 网络简介

BP 算法则是多层前馈网络学习的计算方法，其共含有输入层、中间层、输出层三层网络结构。其中间层则是在输入层和输出层之间，多层结构或是单层结构组成，由于它们并不会同外界直接联系，因此常被称之为隐层。隐层神经元即可成为隐单元，虽然并不同外界连接，但是实际状态会对输入、输出层之间的关系造成影响。换言之，通过对其隐层权系数值的变化，即可显著改善多层神经网络性能。

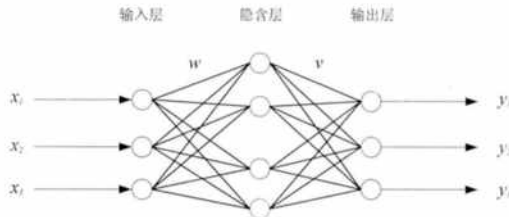


图1 前馈型三层 BP 网络结构图

BP 网络学习过程是历经样本的输入、输出、误差的输入、输出四个阶段组成，如图 2 所示^[5]。

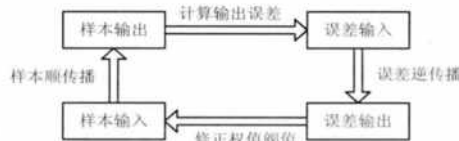


图2 BP 学习过程

(三) 航空发动机的故障分析及诊断

1. 航空发动机气路故障分析

鉴于航空发动机在实际应用过程中，其相关零部件会深受腐蚀、侵蚀、损坏、积污、打伤、导向叶片偏离额定位置等问题，致使发动机实际机件结构尺寸出现变化问题，从而致使发动机部件性能出现恶化、衰退等问题，以至于航空器难以安全工作，频频出现风扇故障、压气机故障等问题，从而加剧压力情况、改变绝热效率。涡轮故障也将会改变其导向器有效面积及涡轮膨胀效率。排气系统出现故障问题则会引发航空器喷孔工作面积发生变化，引起航空发动机相匹配工作点出现变化，引发气路故障。如若发动机故障问题所引发的性能衰退过程，视作为正向过程，则相应的故障诊断则是其逆向过程，即可依据发动机参数的监测，确定该发动机相关部件性能^[6]。

2. 航空发动机气路故障诊断

航空发动机气路故障的诊断，即可通过发动机可观测参数同健康基线予以比较，所产生偏差问题即可视为部件故障依据。然而，鉴于系统是高度非线性，其测量不足、偏差噪音均可引发传感器测量的不精准性，因此对航空器发动机所有参数偏差进行计算不可行。因此，亟需进行系列假设。简明航空器燃气涡轮发动机气路故障的诊断方法如图 3 所示。

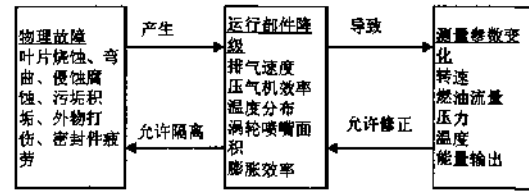


图3 航空器燃气涡轮发动机气路故障的诊断方法

首先，会进行各种可能故障及性能恶化范围的设置，来确定搜索性能参数的搜索空间。其次，将其故障、性能退化特征予以充分提取。最后，依托故障分组方式，将其故障部件隔离^[7]。假设其中所被测对象全部可能会发生的状态集合为状态空间，包括故障状态和正常状态，其中可测量的全部取值范围即可视为特征空间，直至该系统处于状态 S 时，即可代表它具有特征 y，因此存在一定的映射 G:

$$G: S \rightarrow y$$

反之，则一定系统特征也存在对应确定状态，即可存在映射 F:

$$F: y \rightarrow S$$

如若该特征空间同状态空间之间存在一对一满射状态，则通过特征向量，即可确定其系统实际工作状态。故障诊断目的在于，依据可测量特征向量，进行系统状态的判断，其中故障诊断的任务则是找寻映射 f。由此可见，故障诊断同一般问题解决的逆向过程大致相同，于发动机理论而言，正想问题是依据其发动机部件特性、几何尺寸进行发动机性能状态的确定，其中发动机故障诊断即为上述问题逆向问题，即依据该航空器发动机测量参数，进行发动机故障状态的确定，其基于 BP 神经网络的故障诊断流程如图 4 所示^[8]。

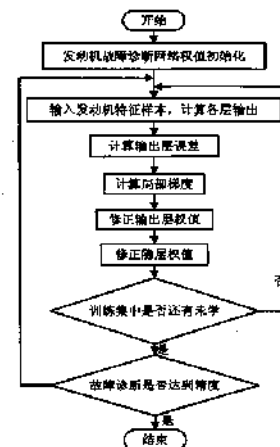


图4 基于 BP 神经网络的故障诊断流程

四、结语

综上所述，通过对航空发动机故障诊断技术的研究，即可发现航空发动机故障诊断技术丰富多样，且历经几十年的演变创新。其中，神经网络诊断技术将以人工神经网络模型为基础，BP 网络参数为其选择原则，构建起基于 BP 神经网络的故障诊断流程，实现故障精确诊断，

提高诊断效率。

参考文献:

[1] 吴金钟, 艾延廷, 陈英涛, 田晶. 基于盲源分离技术的航空发动机轴承故障诊断 [J]. 滨州学院学报, 2022,38(02):27-35. DOI:10.13486/j.cnki.1673-2618. 2022.02.004.

[2] 曹明, 王鹏, 左洪福, 曾海军, 孙见忠, 杨卫东, 魏芳, 陈雪峰. 民用航空发动机故障诊断与健康管理现状、挑战与机遇 II: 地面综合诊断、寿命管理和智能维护维修决策 [J]. 航空学报, 2022,43(09):42-81.

[3] 吴伟力, 陈大力. 航空发动机振动故障诊断及发展趋势 [J]. 航空动力, 2021(03):69-72.

[4] 巩小强, 李冲, 杨宇. 基于半监督协同训练的航空发动机故障诊断技术研究 [J]. 民航学报, 2021,5(01):55-

58.

[5] 朱涛. 基于 ABC-BP 神经网络的航空发动机故障诊断方法研究 [J]. 电子制作, 2020(Z1):82-83+55. DOI:10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2020.z1.029.

[6] 张栋善, 赵成. 试分析航空发动机故障诊断技术 [J]. 中国新通信, 2019,21(17):139-140.

[7] 于德会, 唐有才, 王晓钢. 航空发动机故障诊断技术现状及发展研究 [J]. 航空维修与工程, 2015(10):36-40. DOI:10.19302/j.cnki.1672-0989.2015.10.008.

[8] 王英, 沙云东. 航空发动机故障诊断技术综述 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2007(02):11-14.

作者简介: 唐晓辉, 男 (1977.03-), 汉族, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 空装驻沈阳地区第二军事代表室主任。研究方向: 航空发动机。