

大飞机机载设备的故障诊断方法*

Research on Fault Diagnosis Method With Airborne Equipment of Large Aircraft

中国飞行试验研究院航电所 陈宁
中航工业第一飞机设计研究院飞控液压所 邱岳恒 赵鹏轩
北京宇航系统工程研究所 刘秉



陈宁

中国飞行试验研究院高级工程师,兼任陕西省电磁兼容专业委员会副主任委员。研究方向:机载天线设计、电磁兼容性测试、飞机航电系统试飞。发表论文 10 余篇,荣获省部级科技成果奖 4 次。

机载设备主要指装备在飞机上的电子设备,包括雷达系统、无线电系统和导航系统的相关设备等^[1],作为在飞机上不可或缺的功能保障系

近年来,故障诊断方法在国内外发展很快,并取得了许多理论研究和应用成果。为了能够系统地描述现有的故障诊断方法,本文介绍了机载设备的故障诊断流程;将现有的故障诊断方法分为 3 类,分别为基于定量模型的故障诊断方法、基于定性模型的故障诊断方法和基于过程历史数据的故障诊断方法;并针对在工程实践和科学研究中遇到的尚待解决的问题,提出了新的研究方向。

统,其安全可靠对保证飞机的稳定飞行和任务完成具有重要作用。

由于机载设备自身的多层次性和复杂性,其单元之间及单元内部一般存在很多错综复杂的关联,不确定的因素和信息充斥其间,使得机载设备发生故障时,故障不会孤立存在,表现为故障关联和多故障等复杂形式^[2]。因此,当故障发生后,如果不能及时检测并隔离故障,将会造成系统失效,甚至导致灾难性后果。

实现机载设备的故障诊断,首先需要鉴定机载设备的性能状态是否正常,如果不正常则需要确定故障的性质、部位、起因以及提出排除故障的具体措施。

随着计算机技术的发展,故障诊断方法不断融入新的理念。发展至今,大致经历了 3 个阶段^[1],分别为(1)20 世纪 60 年代之前,随着现代计算机与检测技术的发展使故障诊断过程摆脱了依靠个体专家感官获取机载设备的状态信息,凭借其经验直接做出诊断的阶段;(2)60 年代之后,伴随着传感器、动态测试和信号处理技术的应用,进入了基于信号处理的诊断阶段;(3)90 年代至今,当人工智能技术特别是知识工程、专家系统等方法出现后,诊断方法进入了智能化阶段。

1990 年,国际控制系统故障诊断权威 Frank P M 教授将故障诊断方法

* 国家自然科学基金资助(60974146)、航空科学基金(20100753009)。

划分为基于解析模型的方法、基于知识的方法和基于信号处理的方法^[1], 获得了许多学者的认同。随着理论研究的深入和相关领域的发展, 各种新的诊断方法也层出不穷, 上述划分方式已经不是十分准确, 因此, 本文将故障诊断方法归纳为基于定量模型的方法、基于定性模型的方法和基于过程历史数据的方法等三大类。

机载设备故障

1 故障特征

大部分机载设备属于电子设备, 从故障发生的时间上可将机载设备的故障分为两类:(1)由系统参数的逐步劣化引起的渐进性故障;(2)因系统外部原因对系统冲击造成的突发性故障。

由图1可以看出, 在使用阶段为一常数, 机载设备在大部分时间内

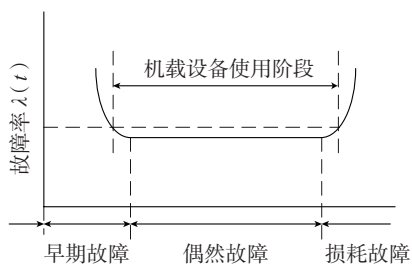


图1 浴盆曲线

都处于偶然故障期, 故障的发生是突发性的, 机载设备的故障特征为:

(1) 随机性: 机载设备中的元器件容易受到外部因素(温度, 湿度等)的影响, 故障的发生是一个与时间紧密相关的非平稳的随机过程。

(2) 层次性: 机载设备由许多子系统, 部件及元器件组成, 具有层次性, 因此, 故障也具有层次性。

(3) 传播性: 复杂电子系统由若干相互联系的子系统组成, 某些子系统的故障是由与之相关的系统或下一级子系统故障传播所致。

(4) 时间性: 系统故障的产生与表现与时间以及运行的动态性有关。

2 故障分类

机载设备正常运行不仅与设备自身情况, 还与设备所处的环境、组成特点、结构形式、使用维修等诸多因素有关^[2]。按功能影响、发生速率、危害程度和故障原因等因素, 对机载

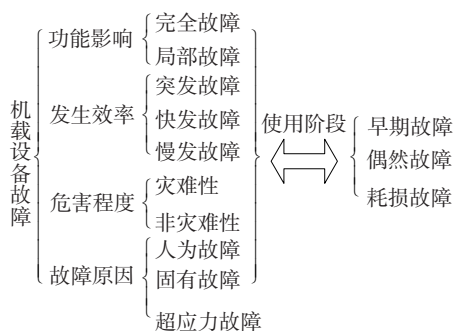


图2 机载设备故障分类

设备的故障可分为, 见图2。

3 故障表现形式

机载设备的故障表现形式可以分为以下4种, 分别为:

(1) 系统故障: 由于数字或综合电子信息系统是层次分布式系统网络结构, 如果相同层次的各装置同时发生故障, 将会影响整个系统的运行。

(2) 硬件故障: 构成系统的物理元器件的工作参数偏离其正常范围或完全损坏。

(3) 逻辑故障: 逻辑部件的输入/输出关系不正确。

(4) 软件故障: 在系统运行中, 不是硬件故障或逻辑故障引起的, 而是由于软件本身设计上的错误。

机载设备故障诊断方法

机载设备的故障诊断主要研究各个机载设备的运行状态, 基本过程如图3所示。

故障诊断包括以下3个方面:

(1) 故障的特征提取: 通过测量和接收信号, 并对其进行信息处理以提取系统的故障特征。

(2) 故障的分离与估计: 根据故障特征确定系统是否出现故障以及故障的程度。

(3) 故障的评价与决策: 根据故障分离与估计的结果对故障的危害及严重程度做出评价, 进而做出是否停止进程以及是否需要维修更换的决策。

1 基于定量模型的方法

基于定量模型的方法是发展最早、研究最为系统的一种故障诊断方法, 分为状态估计法、参数估计法和等价空间法等3种方法。

1.1 状态估计法

被控过程的状态能直接反映系统的运行状态, 只要估计出系统的状态, 并结合恰当的模型, 构造出对应残差序列, 再对残差进行分析处理, 即可实现对系统的故障诊断^[4]。通常可用观测器、卡尔曼滤波器以及多模型等方法实现对系统的状态估计。

(1) 观测器法。

针对线性系统, Frank通过比较系统的估计输出与实际输出, 实现基于观测器的故障诊断^[5]。在实际工程中, 由于系统大多是非线性且难于建

立对应的数学模型, 有许多机构对其进行了研究, 如针对航空发动机非线性分布式控制系统的故障诊断问题, 翟旭升提出了基于飞行包线划分的航空发动机非线性 Takagi-Sugeno(T-S) 建模方法^[6]; 当航空发动机故障时, 傅强设计了基于观测器的鲁棒故障诊断器^[7]。

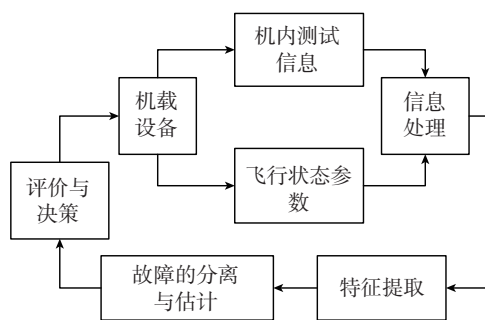


图3 机载设备故障诊断的基本流程

(2) 卡尔曼滤波器法。

与观测器法相比,卡尔曼滤波器(KF)的运算量较大,但对数学模型的要求较低,它以递推形式,在白噪声影响下实现对系统的状态估计,并在最小均方差,极大后验等准则下达到最优或次优^[8]。

为了解决非线性系统的滤波问题,出现了扩展卡尔曼滤波(EKF)方法,其理论为对非线性函数的泰勒展开式作一阶截断,忽略高阶项的影响^[9]。但是,当系统为强非线性时,被忽略的高阶项将会带来较大的误差,可能导致滤波精度下降甚至发散。为了解决上述问题,出现了许多关于EKF的改进方法,但由于其理论局限,效果均不理想,直到确定采样型滤波(SPKF)方法的出现,SPKF继承了KF的结构形式,不同之处在于用确定Sigma点近似概率分布取代了局部线性化,实现了状态的估计,在滤波精度和实现方式上体现出更大的优越性,从而倍受瞩目^[10]。

(3) 多模型法。

多模型方法经常和卡尔曼滤波器一起应用于系统的故障诊断中,主要针对可预测故障建立一组模型,将这组模型的输出与实际对象输出相比产生残差,具有最小误差的模型就是当前的故障系统,从而实现系统的故障检测和隔离^[11]。

多模型方法的典型代表为多模型自适应估计法(MMAE)^[9-11],交互式多模型法(IMM)^[12]和变结构多模型法(VSMM)^[13],均被广泛应用于飞机的故障诊断中,如Qiu Yueheng^[9]将MMAE应用于飞机操纵面故障的容错控制系统中;在传感器和执行器的全局故障和局部故障模型的基础上,贾彩娟应用IMM对传感器和执行器的各种软硬故障进行诊断;Liu Z J采用VSMM实现飞机执行机构和传感器的故障诊断^[13]。

1.2 参数估计法

参数估计法不同于状态估计法,它不需要计算残差序列,仅根据系统

参数及相应的过程参数变化的统计特性来检测故障的发生^[14]。常用方法有最小二乘法^[15]、子空间法^[16]、集员辨识法^[17]、强跟踪滤波器法^[18]等方法。例如:Jie He采用递推最小二乘法实现对飞机热交换器的故障诊断^[15];针对异步电机的故障诊断逐渐成为设计的核心,Guillaume Bouleux提出了基于子空间法的故障诊断方法;在处理数学模型不精确已知系统的故障检测问题中,孙先仿给出了一种故障检测的集员辨识方法^[17];为了快速准确地获得作动器的故障信息,柳志娟提出了一种基于强跟踪多模型自适应估计器的故障诊断方法^[18]。

以上研究表明,与状态估计法相比,参数估计方法更利于故障的分离,但存在计算量偏大的问题。

1.3 等价空间法

等价空间法是利用系统的可测输入输出变量检测系统数学方程的一致性来实现系统的故障诊断^[19],适用于检测多故障的发生。在故障诊断的研究过程中,等价空间法的适用范围得到了进一步的推广,例如,该方法先后被推广到线性系统和非线性系统,具体包括双线性系统^[20]和一类特殊的非线性系统^[21];Staroswiecki还将其推广到多项式非线性系统^[22]。

综上所述,如果能够建立系统模型且对故障种类有先验知识,基于定量模型的故障诊断方法的诊断效果最佳,且更适用于线性系统,但实际系统往往是非线性且故障耦合存在,难于建立准确的数学模型。因此,基于定性模型和过程数据这2类不需要建立准确模型的方法被引入到机载设备的故障诊断中。

2 基于定性模型的方法

基于定性模型的故障诊断方法通过抽象化方法直接建立各种过程变量与故障模式之间的定性模型,然后与实际的系统行为进行比较,即可判断系统是否发生故障^[23]。这种方

法又分为因果模型法和抽象层次法,具体包括定性仿真法、知识观测器法、抽象层次法、有向图方法、故障树方法等方法。

2.1 定性仿真法

1986年Kuipers提出定性仿真法,该方法主要根据系统的故障模型进行诊断推理^[24]。首先,利用定性变量(系统物理参数)和定性微分方程(参数间相互关系)构造约束模型;然后,通过约束模型描述和模仿系统的结构,得到由约定初始状态出发的系统状态。

2.2 知识观测器法

知识观测器法主要建立定性模型预测系统行为,根据实际系统和定性模型的行为差异,将原定性模型修改为故障模型。这种方法由定性模型、差异检测器、候选人发生器及相应诊断策略组成,核心是定性模型。例如,Z Zhuang基于知识观测器法,并结合马尔科夫链模型进行故障诊断^[25]。

2.3 抽象层次法

抽象层次法采用结构化或功能化这2种方式将过程知识进行分解,并根据子系统的规律推导整个系统的行为。因此,基于抽象层次的故障诊断是从高到低的方式进行搜索,即从高层次抽象(系统设备和系统功能)到低层次抽象(个体单位和单位功能)。

2.4 有向图法

有向图法(SDG)是根据系统过程的因果关系推导出系统结构,系统结构由节点和各个有向支路组成,并用节点间的符号逻辑关系定位系统的故障源。SDG模型决定了故障诊断的性能和效果,建模方法主要有以下3种:S A Lapp提出的基于流程图的方法直观形象,但模型较为复杂^[26];T.umedu介绍的基于数学模型的方法易于表达过程变量关系,但推导繁琐不易描述故障^[27];刘敏华基于经验知识建立的模型比较直观,不包含不可测节点,实用性强,但可能会遗漏一些故

障模式^[28]。SDG 在故障诊断中已有广泛的应用,如 Ii M 首次使用 SDG 的概念进行单故障的诊断^[29]; Wen-liang Cao 基于定性模型,结合 SDG 方法实现系统的故障诊断^[30];针对 SDG 模型特点及局限性, Fan Yang 引入了故障显现时间,通过初始响应的故障显现时间及其顺序达到故障源搜索的目的^[31]。

2.5 故障树法

故障树法 (FTA) 是一种由总体至局部将系统故障的形成原因按树枝状逐渐细化的分析方法。FTA 将系统中最不希望发生的事件作为顶事件,可能导致顶事件发生的其他事件作为中间事件和底事件,用逻辑门表示事件之间的逻辑关系。

FTA 诊断技术兼顾了定性和定量模型诊断的优点,现已广泛应用于故障诊断领域。例如:钟杰夫采用故障树分析法与基于规则相结合的方法进行了 A320 自动飞行系统故障诊断系统的研究^[32];在对故障数据进行搜集、整理和分析的基础上,刘江基于规则与 FTA 完成对 Cessna-172R 的 IO-360-L2A 发动机故障诊断系统的研究^[33]。但是,FTA 诊断技术的核心在于建立正确的故障树,故障树建立的不全面或不正确将导致诊断结果失效。

由此可见,基于定性模型的故障诊断方法一般比较简单,构造模型容易、可靠性高、解析能力强、鲁棒性好,具有新故障辨识能力等优点。同时,该方法也存在诸多不足,采用定性方法描述系统时,预测结果较为保守,容易忽略微小的故障。

3 基于过程历史数据的方法

不同于以上 2 类方法,过程历史数据法不需要过程先验知识,只需大量有效的过程历史数据,并通过数据处理与分析方法(如多元统计方法,聚类分析、频谱分析、小波分析等)挖掘出数据中隐含的信息,提高监控系统的监控和故障诊断能力。基于

历史数据的故障诊断方法可分为定量法和定性法。

3.1 定量法

过程历史数据的定量法的基本思想是对抽样的实时数据进行特征提取,具体可分为非统计学法和统计学法。非统计学法为人工免疫系统 (AIS);统计学法包括主元分析法 (PCA),支持向量机 (SVM) 等方法。

(1) 人工免疫系统。

基于人工免疫系统的故障诊断方法分为 2 个阶段

a. 学习阶段:选定合适的网络结构和规模,借助一定的学习算法,以能够反映系统的动态特性、建模误差和干扰影响的变量作为神经网络的输入,以对应的状态编码为期望输出,构成期望输入/输出样本,对神经网络进行训练,确定神经网络的权值和阈值。

b. 故障诊断阶段:使用训练好的神经网络,一个给定的输入产生一个相应的输出,比较输出和故障编码即可确定故障。

至今, AIS 已成功应用到故障诊断领域,并取得了明显成效,例如:徐力平将神经网络应用于导航传感器的故障监测中^[34];针对陀螺仪信号的特点,马吉臣基于小波分析的陀螺仪信号的特征提取,建立了关于小波分析和神经网络的故障诊断模型^[35]; Hever Moncayo 采用人工免疫系统实现对飞机传感器、操纵面和发动机的故障诊断^[36]。

(2) 主元分析法。

主元分析 (PCA) 是一种多变量统计分析技术,用于对数据进行分析降维,可以有效的找出数据中最“主要”的元素和结构^[37]。它的优点是简单,而且无参数限制,在故障诊断领域中应用广泛。例如:当系统将来的正常状态与过去的正常行为类似,出现任何在统计上显著偏离的事件都会被看作异常事件或是故障的情况, Haiqing Wang 应用 PCA 进行故

障检测和识别^[38];针对航空发动机的压力温度转速等传感器常见的故障,龚志飞提出了主元分析法故障诊断算法^[39]。

(3) 支持向量机。

支持向量机 (SVM) 方法是在统计学习理论的基础上发展起来新型机器学习方法,核心思想是根据有限样本信息在模型复杂度和学习能力之间选择最小的结构风险,以获得最好的泛化能力,有效地解决了系统小样本和非线性的情况,较好地克服神经网络容易出现的过学习和泛化能力低等缺陷^[40-41]。从推广能力的角度来看,该方法更适用于故障诊断领域,例如:徐启华提出一种基于支持向量机的航空发动机故障诊断方法,成功对发动机气路部件的几种典型故障进行了正确诊断^[42];为了解决航空发动机故障诊断中因缺乏样本和突发故障信息难以提取的问题,王仲生基于支持向量机实现对发动机的故障识别与监控^[43]。

3.2 定性法

定性方法中应用最广的是基于规则的专家系统方法和定性趋势分析方法。

(1) 专家系统。

专家系统的基本思想是利用人工智能的理论和方法将人类专家的知识、经验和技巧转移到计算机上,并通过程序推理只有专家才能解决的问题。目前常用的故障诊断专家系统模型有以下 5 种^[2]:

a. 基于规则。将以往的专家经验与专家知识,归纳成为一定的规则,通过启发式经验知识进行故障诊断,适用于具有丰富经验和知识的专业领域故障诊断。

b. 基于模糊理论。模糊逻辑以其较强的结构性知识表达能力,适于处理不确定信息和不完整信息。

c. 基于行为。基于行为的故障诊断专家系统是一种动态的、模块化的诊断系统。

d. 基于神经网络。神经网络具备较好的容错性、响应快、学习、自适应和非线性逼近等能力。

e. 基于案例推理。是近年来人工智能领域新兴的一种诊断推理策略,是类比推理的一个独立子类,符合人类的认知心理。

近年来,逐渐形成了以机载设备为研究对象的定性故障诊断专家系统,例如:王玉刚建立了飞机航空电子设备的故障诊断专家系统,将规则推理与 Hash 算法相合实现了故障的快速定位^[44];针对波音 777 飞机复杂的故障级联效应会导致导航设备维修效率低下的问题,周德新提出了一种基于案例与故障树推理相结合的故障诊断专家系统^[45]。

虽然专家系统能解决许多实际问题,但仍存在某些缺陷,首先,故障诊断的精确度与知识库的大小成正比,而知识的获得往往又受诸多因素限制;其次,专家系统主要应用于大型复杂系统,而当系统逐渐增大时,知识库又趋于复杂,影响推理的效率。

(2) 定性趋势分析法。

定性趋势分析法的基本思想是利用趋势将时间序列转换为基元序列,并采用相容度检验或基于模糊逻辑的相似度检验将实时趋势与知识库里的特征趋势相匹配,从而实现过程状态或行为的检测。

基于定性趋势分析法的故障诊断方法具有快速检测诊断故障、解析能力强、良好的鲁棒性、辨识新故障能力等优点,广泛应用于系统的故障诊断中^[46]。由于该方法主要基于数据,计算提取趋势过程的时间将会限制这种方法的应用。

故障诊断方法研究方向

1 融合故障诊断方法

基于定量模型、定性模型和过程历史数据的诊断方法各有其优势和特点,但也存在着局限性。在实际工作中,采用单一的方法,难以准确快

速地对复杂对象进行故障诊断。例如,基于定量模型的方法需要系统的数学模型及模型偏差、干扰界限等有关的信息,但在实际中定量地获取有些信息有时是困难的。而基于定性模型方法不依赖于系统的数学模型,在处理不确定性问题,特别是定性问题方面有其自身的优点。将这 2 种方法相结合,可以充分发挥各自的优点,有望对复杂的被控对象进行准确、有效地故障诊断。

因此,将多种不同的故障诊断技术结合起来的融合诊断系统,不仅能综合各诊断方法的特点,还能克服各诊断方法的局限性,提高了诊断系统的智能性和诊断效率,是故障诊断研究的一个热点方向。

2 鲁棒故障诊断方法

在工程实践中,控制系统中普遍存在的不确定性现象使得故障诊断方法的鲁棒性问题具有重要的实际意义。对于鲁棒故障诊断问题,已经开展了许多的研究工作,但仍有许多问题需要进行更为深入的研究。

(1) 不确定因素。目前的研究工作主要集中在增强故障诊断系统对模型误差、噪声、干扰等不确定因素的鲁棒性,以提高故障诊断的准确性,还没有分析这些因素怎样影响系统的故障诊断。

(2) 新方法。在状态估计、参数估计等控制学科领域出现了一系列新方法(如 H₂/H_∞ 混合滤波、Petri 网络、智能体 (Agent) 等方法)。在故障诊断领域中引入这些新方法,可以形成新的鲁棒故障诊断方法。这些方法能抑制模型不确定性对系统的影响,优化系统性能,提高故障诊断的效率。

(3) 决策方面。现有的故障诊断方法有一定的局限性和不足之处,例如,基于定量模型的方法一般利用了模型偏差、未知干扰等的上界设计阈值,虽然能够降低虚警,但可能产生漏报的问题,影响故障诊断的准确

性。因此,如何设计阈值,使得故障诊断系统既具有良好的故障检测能力,又能很好地抑制虚警,值得进一步开展研究。

3 非线性故障诊断方法

关于非线性系统的故障诊断已经有众多的研究成果,但这些成果大多研究故障的检测问题,较少关注故障的分离和估计,且大部分针对单故障的情况进行研究。因此,多故障的分离和估计是亟待解决的问题。尚需深入研究的领域为:

(1) 复杂非线性系统。复杂非线性系统没有统一的数学描述且具有强非线性、强耦合和时滞等特性,难以建立精确的非线性数学模型。

(2) 特定非线性系统。一般的故障诊断方法很难适用一些特定系统,如分布式非线性、混杂、非线性耗散、网络控制等系统。

结束语

近年来,故障诊断方法在国内外发展很快,并取得了许多理论研究和应用成果。为了能够系统地描述现有的故障诊断方法,本文介绍了机载设备的故障诊断流程;将现有的故障诊断方法分为 3 类,分别为基于定量模型的故障诊断方法、基于定性模型的故障诊断方法和基于过程历史数据的故障诊断方法,并针对在工程实践和科学研究中遇到的尚待解决的问题,提出了新的研究方向。

参考文献

- [1] 王波. 基于 CBR 的飞机机载设备故障诊断系统的研究[D]. 西北工业大学, 2007.
- [2] 吴卫玲. 机载设备智能故障诊断系统的研究[D]. 南京理工大学, 2004.
- [3] Frank P M. Fault diagnosis in dynamics systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some

本文共有参考文献 46 篇, 因篇章有限, 未能一一列出, 如有需要, 请向本刊编辑部索取。

(责编 小城)