

防空导弹武器系统故障诊断技术探究

张卫 师剑军 蔡飞

(空军工程大学导弹学院, 三原 713800)



摘要: 对主要的故障诊断技术进行了系统地归纳和分类, 并重点讨论了基于知识处理的智能故障诊断方法, 对专家系统故障诊断方法、故障树故障诊断方法、模糊故障诊断方法、神经网络故障诊断方法以及基于支持向量机的故障诊断方法进行了详细介绍。

关键词: 防空导弹; 故障诊断; 智能

Exploration on Fault Diagnosis Technology of Air-defense Missile Weapon System

Zhang Wei Shi Jianjun Cai Fei

(The Missile Institute of Air Force Engineering University, Sanyuan 713800)

Abstract: The paper gives a systematic summary and classification on major fault diagnosis technology, and mainly discusses the intelligent fault diagnosis method based on the processing of knowledge. Expert system fault diagnosis method, fault tree fault diagnosis method, fuzzy fault diagnosis method, neural network fault diagnosis method and the fault diagnosis method based on support vector machine are introduced in detail.

Key words: air defense missile; fault diagnosis; intelligence

1 引言

防空导弹武器系统呈现出高度自动化、信息化、系统化和智能化的发展趋势, 其系统的复杂性越来越高, 但同时防空导弹武器系统的维护难度也越来越大, 单对某一或某些局部的检测或采用单一的故障诊断方法往往很难对系统进行全面彻底的诊断, 而且诊断效率较低, 经常造成误拆好的部件及进行“无故障”维修。由于故障诊断能力的不足, 防空导弹武器系统出现了许多测试、诊断等问题, 因而仅靠专业人员维护的方式已经远远无法满足现代战争的要求。由此可见, 防空导弹武器系统故障检测及诊断能力的高低已成为制约装备的战备完好性及作战效能的关键因素。

故障诊断技术是一门应用型综合学科, 它的理论基础涉及现代控制理论、计算机工程、数理统计、信号处理、模式识别、人工智能以及相应的应用学科。所谓故障诊断就是判断系统和设备的工作状态是否正常, 确定故障性质, 发现故障的部位, 故障诊断包

括数据预处理、特征提取、故障的分离与估计, 以及故障评价与决策等几方面的内容:

a. 故障的特征提取: 通过测量和一定的信息处理技术获取反应系统故障的特征描述过程。

b. 故障的分离与估计: 根据检测的故障特征确定系统是否出现故障以及故障的程度及过程。

c. 故障的评价与决策: 根据故障分离与估计的结论对故障的危害及严重程度做出评价。

根据系统采用的特征描述和决策方法的差异形成不同的故障方法, 概括起来有: 依赖于模型的故障诊断方法和不依赖于模型的故障诊断方法两大类, 不依赖模型的故障诊断方法又可分为基于直接可测信号的故障诊断和基于知识处理的智能故障诊断方法。

2 依赖于模型的故障诊断方法

基于模型的诊断方法是发展最早、研究最系统的一种故障诊断方法。麻省理工学院 Beard 博士在 1971 年首先提出了故障诊断检测滤波器的概念, 标志着基

作者简介: 张卫 (1987-), 硕士, 检测技术与自动化装置专业; 研究方向: 现代检测理论与检测技术。

收稿日期: 2011-01-17

于状态估计的解析冗余故障诊断方法的诞生。状态估计方法的基本思想是：首先重构被控过程的状态，通过与可测变量比较构成残差序列，再构造适当的模型并用统计检验法从残差序列中把故障检测出来。因此，这就要求系统可观测或部分可观测，通常用各种状态观测器或滤波器进行状态估计。H.Yanf 和 M.Saif 提出了一种未知输入的双线性观测器的设计方法。这也是一种非线性未知输入观测器方法。Yu D 和 D.N. Shields 给出了结合观测器和滤波器对双线性系统进行故障诊断的方法。J.J.Gerile 首先用等价方程方法构造基本残差，再对基本残差做线性变换，使得变换后得到的残差能够与干扰完全解耦。基于状态估计的方法先是要通过得到真实系统与状态观测器或卡尔曼滤波器的输出的差值获取残差，然后从残差中提取故障特征实现故障诊断。

1984 年 Iserman 对基于参数估计的故障诊断方法做出了完整的描述。这种故障诊断方法实现故障诊断的思路是：由机理分析确定系统的模型参数和物理元器件参数之间的关系方程 $\theta = f(P)$ ，由实时辨识求得系统的实际模型参数 $\hat{\theta}$ ，由 $\theta = f(P)$ 和 $\hat{\theta}$ 求解实际的物理元器件参数 $\hat{P}$ ，将 $\hat{P}$ 和 P 的标称值比较从而确定系统是否故障及故障的程度。参数估计方法与状态估计方法不同，不需要计算残差序列，而是根据参数变化的统计特性来检测故障的发生。1993 年周华东和孙优贤等提出了一类非线性系统参数偏差型故障的检测与诊断方法，它先用扩展卡尔曼滤波器与残差加权平方和算法构成快速故障检测算法，再扩展系统状态，用强跟踪滤波器估计系统状态与参数，最后用修正的 Bayes 分类算法诊断故障。

但不论是状态估计法还是参数估计法，故障诊断首先需要建立起被诊断对象的较为精确的数学模型，而这对于非线性复杂大系统的故障诊断来说是比较困难的。

3 基于直接可测信号的故障诊断方法

这类方法不需要对象的准确模型，因此适用性强。虽然，目前大多数方法都是针对线性系统提出的，但很容易推广到非线性系统，除非其中应用了线性系统的某些特性。基于可测信号的故障诊断方法根据直接可测的输入输出及其变化趋势来进行故障诊断，其依据是：正常情况下，被控过程的输入输出及其变化趋势在一定范围内变动，即 $u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$ 或 $y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}$ 。

系统的输出在幅值、相位、频率及相关性上与故

障源存在着某种关系，利用这种关系可确定系统的故障。基于可测信号的故障诊断方法就是通过利用信号模型，如相关函数、频谱、自回归滑动平均等，直接分析可测信号，提取诸如方差、幅值、频率等特征值，从而检测故障的发生。近年来出现了一些新的基于信号处理的故障诊断方法。主要有：绝对值检验和趋势检验；基于信息融合的方法；利用 Kullback 信息准则的故障检测方法；基于自适应滑动窗格形滤波器的故障检测方法；基于信号模态估计的故障检测方法；基于小波变换的故障诊断方法；基于信息校核的方法；谱分析法；相关分析法。

在基于信号分析的故障诊断技术中，小波变换由于能够以不同的“尺度”或“分辨率”来观察信号，具有变时域-频域窗，因此，可用来对突变信号进行检测。利用小波变换进行故障诊断的基本思路是：首先对系统的输入和被检测信号（系统的输出或可能的状态变量）进行小波变换，然后利用该变换求出输入输出信号的奇异点，分析不同尺度下信号的变换结果，再去除由于输入突变所引起的奇异点，其余的奇异点就是故障发生点。1997 年到 1998 年叶昊等给出了三种基于小波变换的故障诊断方法：利用观测信号的奇异性进行故障诊断；利用观测信号频率结构的变化进行故障诊断；利用脉冲响应函数的小波变换进行故障诊断。

2001 年王敏等提出了基于多传感器数据的故障诊断融合技术的框架，给出了故障诊断融合技术的具体过程与算法、提高系统柔性及开放性的方法以及与其他故障诊断方法相融合的方法与算法。它是将多个传感器测得的故障诊断对象的数据，首先进行预处理，然后将这些数据送入故障诊断单元，确定对象可能出现的故障单元，决策融合部分运用数据融合技术，对各个故障诊断单元的输出进行融合推断，从而确定对象是否出现故障，以及最有可能出现的故障单元。

这种故障诊断方法的缺点是：依赖对信号的检测和处理，因此会受到信号噪声的影响；通常只局限于用特定信号诊断某些特定的故障，未能考虑到各种故障间的相互影响；当对象比较大且复杂时，需要增加相应的检测手段和信号处理量；诊断系统往往只局限于某一具体系统或故障的诊断，难于进行扩充或应用于不同的诊断对象。

4 基于知识处理的智能故障诊断方法

人工智能及计算机技术的飞速发展，为故障诊断

技术提供了理论基础,产生了基于知识处理的诊断方法,此方法由于不需要对象的精确数学模型,因而针对越来越复杂的系统具有很好的应用前景。基于知识处理的故障诊断方法主要可以分为:专家系统故障诊断方法、故障树故障诊断方法、模糊故障诊断方法、神经网络故障诊断方法、基于支持向量机的故障诊断方法等。

4.1 专家系统故障诊断方法

专家系统是研究以解决某专门问题的专家知识建立人机系统的方法和技术,专家知识包括整个具体专业领域的知识,对领域内问题的理解以及解决这些问题的技能。专家在解决问题时一般都要用到在已发表的文字材料中找不到的个人知识,称为启发性(Heuristic)知识,启发性知识能使专家在需要时做出有效的猜测,辨别有希望的求解途径,并有效地处理错误和不完全数据,解释并重新组织这些知识就是建造专家系统的任务。专家具有解决某些专门问题的能力。这种能力来自于他们所具有的丰富的经验,以及掌握了所处理问题的详细的专门知识。为了能像专家那样解决问题,以计算机为基础的专家系统力求收集足够的专家知识,专家系统的首要问题是知识的获取与表达。

专家系统故障诊断方法,是指计算机在采集被诊断对象的信息后,综合运用各种规则,进行一系列的推理,必要时还可以随时调用各种应用程序,运行过程中向用户索取必要的信息后,就可快速找到最终故障或最有可能的故障,再由用户来证实。专家系统故障诊断系统是由数据库、知识规则库、人机接口、推理机等组成。

专家系统故障诊断根本目的在于利用专家的知识、经验为故障诊断服务。目前在机械系统、电子设备等方面已有成功的应用。美国宇航局 NASA 研制了用于动力系统诊断的专家系统,英国 Logistic Command 研制了用于飞机喷气发动机故障诊断的专家系统,而英国宇航局 Lanley 研究中心研制了飞行器故障诊断专家系统(Fault-Finder)。在可靠性和维修性要求较高的航空航天等领域中,需要利用自动故障诊断和维修专家系统来保障火箭、卫星和导弹试验以及基地飞行试验的安全。80年代中后期以来,我国不少科研院所先后开展了故障诊断专家系统的研究工作,取得了许多研究成果,并投入工程应用中,产生了巨大的经济效益和社会效益。例如,空军后勤学院研制的某型空空导弹测试仪故障诊断专家系统,哈尔滨工业大学研制的航天器推进系统故障诊断专家系统。

但专家系统的应用依赖于专家的领域知识获取。知识获取被公认为专家系统研究开发中的关键(瓶颈问题,但同时也是利用人工智能解决故障诊断的热点问题),另外在自适应能力、学习能力及实时性方面也都存在不同程度的局限。

4.2 故障树故障诊断方法^[1~4]

故障树诊断方法是一种浅层推理。故障树分析(Fault Tree Analysis,简称 FTA)首先由 Bell 电话实验室的 H.A.Waston 于 1961 年提出,作为分析系统可靠性的数学模型。经过许多学者的发展,迄今已取得了很大进展,成为较为完善的系统可靠性分析技术,广泛应用于各个领域。

在建立故障树之后,要对故障树作进一步分析,以实现故障树的定性和定量的评价,不仅计算量大,且有一定难度,故必须借助计算机来进行。因而如何应用计算机进行故障树分析显得十分重要。为此,许多学者发展了故障树分析的算法。近年来许多研究者提出将二元决策图(Binary Decision Diagrams,简称 BDD)理论应用于故障树分析中。它是 1978 年由 Sheldon B. Akers 提出的一种用来定义、分析、测试和实现大型数字函数的方法。1986 年另一位美国学者 Randal E. Bryant 首先通过指定逻辑变量的次序,将逻辑函数用 BDD 予以表示。通过这两位学者的开拓性工作,使得 BDD 理论迅速在逻辑电路的合成、模拟、测试中获得广泛应用。

用故障树模型进行诊断就是利用现有的测量信息和故障树节点间的逻辑关系进行正向推理和反向推理。利用异常节点作为推理的起始点,利用正常节点进行假设排除,最终确定底事件的状态。如测点充分,则可确定全部底事件的状态(正常或异常),否则把底事件集分成三部分,即必然故障源集、可能故障源集和正常底事件集。必然故障源集中的所有元素均是系统的故障源,可能故障源集中的所有元素则是其可能的故障源。这种基于故障树的故障传播矩阵的推理称为确定性推理,因为推理过程中用到的所有信息都是确定性的,之所以产生可能的故障源集不是因为信息不确定而是信息不足。

基于故障树模型诊断的确定性推理包括正向确定性推理和反向确定性推理。

正向确定性推理,就是根据当前的测量信息和故障树节点间的正向逻辑因果关系进行正向推理(底事件→中间事件→顶事件)来进一步确定故障树上各节点的状态。反向确定性推理,就是根据正向确定性推理确定性故障树上各节点的状态和故障树节点间的反向逻辑因果关系进行反向推理(顶事件→中间事件

→底事件)来最后确定故障树上各节点的状态。为此,建立如下四个知识库:广义规则库(每条广义规则就是故障树上父、子节点间构成的一条反向因果链,父节点对应广义规则的前提,子节点对应广义规则的结论);异常事件库(如果故障树上某一节点的实际状态与期望状态不一致,则把该节点事件放入异常事件库);正常事件库(如果故障树上某一节点的实际状态与期望状态一致,则把该节点事件放入正常事件库);未知事件库(如果故障树上某一节点的实际状态未知,则把该节点事件放入未知事件库)。

尽管可能的故障源集中的每一个元素都处在相同的集合中,但各自对顶事件的影响是不同的,因为每个元素与顶事件构成的通路的权值是不同的。基于带权故障树的故障传播矩阵,把可能的故障源集中的每一个元素按照其与顶事件形成的通路的权值的大小进行排序,权值最小的元素其优先级最高。这种推理过程称为可能性推理。可能性推理体现了信息不足条件下对故障源的最优搜索,同时也为故障预测和维修指明了方向。

4.3 模糊故障诊断方法

由于复杂系统的功能单元很多,各单元及其组合都可能产生故障,其数量是巨大的,很难对其进行状态描述和模拟各种故障情况。大型复杂系统故障的存在具有模糊性:同一故障表现形式呈多种多样,表现为不同特性;几种故障同时发生并相互诱发;最终故障的形成是众多因素造成的结果,而各因素之间既有十分复杂的联系,又各自对最终故障贡献的“权重”十分模糊;故障间的分类具有模糊性,即不同故障具有相似或相近的特性;故障的存在程度具有模糊性。

对于这种模糊现象,用传统的数学工具进行定量诊断往往有困难,而 Zadeh 提出的模糊理论则显示出优越性。模糊推理符合人类的自然思维过程,便于处理定性知识,成为故障诊断方法研究的一个热点^[5-6]。

基于模糊推理的故障诊断方法主要有:直接基于模糊推理的方法;基于模糊模型的故障诊断方法;基于自适应模糊闭值的残差评价方法;基于模糊聚类的残差评价方法;基于模糊逻辑的残差评价方法;基于模糊模式识别的故障诊断方法。模糊方法适用于测量值较少且无法获得精确模型的系统。

模糊聚类分析是依据客观事物间的特征、亲疏程度和相似性,通过建立模糊相似关系,对客观事物进行分类的数学方法。用模糊聚类分析方法处理带有模糊性的聚类问题更为客观、灵活和直观,且计算更加简便。实践表明,它突破了常规逻辑推理方法的局限,在很少先验知识的情况下,能较快和准确地解决故障

诊断问题,方法是行之有效的。

故障诊断通过研究故障与征兆之间的关系来判断设备状态。由于实际因素的复杂性,故障与征兆之间的关系很难用精确的数学模型来表示,随着某些故障状态模糊性的出现,就不能用“是否有故障”的简易诊断结果来表示,而要求给出故障产生的可能性及故障位置和程度如何。此类问题用模糊逻辑能较好地解决,这就产生了模糊故障诊断方法^[7-8]。

用隶属函数刻画诊断对象的故障参数和信息,采用模糊关系矩阵定量描述故障原因与故障征兆之间的模糊关系,通过求解模糊关系方程实现故障诊断的推理过程,进而确定故障原因和类型,实现模糊故障诊断的基本目标。这种方法计算简单,应用方便,结论明确直观。在模糊故障诊断中,构造隶属函数是实现模糊故障诊断的前提,但由于隶属函数是人为构造的,含有一定的主观因素;另外,对特征元素的选择也有一定的要求,如选择得不合理,诊断结果的准确性会下降,甚至造成诊断失败。

4.4 神经网络故障诊断方法

神经网络具有以任意精度逼近任何连续非线性函数的能力和从样本学习的能力,因而在故障诊断领域得到了广泛的应用。神经网络用于故障诊断主要有五种方式:基于模式识别的神经网络故障诊断;用神经网络产生残差;用神经网络评价残差;用神经网络作进一步诊断;用神经网络作自适应误差补偿。

神经网络用于设备故障诊断起源于 20 世纪 80 年代末期。1989 年美国拍杜大学的 Venkat Venkatasubramanian 和 King Chan 等人第一次将神经网络成功地应用于模式匹配和故障诊断中。他们也给出了采用连续变量进行故障诊断的例子,并得出了人工神经网络的一些重要特性。

基于模式识别的神经网络故障诊断过程,主要包括学习(训练)与诊断(匹配)两个过程。其中每个过程都包括预处理和特征提取两部分。具体诊断过程如下。

学习过程:是在一定的标准模式样本的基础上,依据某一分类规则来设计神经网络分类器,并用标准模式训练。

诊断过程:是将未知模式与训练的分类器进行比较来诊断未知模式的故障类别。

a. 预处理:一般来说,首先要对映射得到的样本空间数据进行预处理,主要是通过删除原始数据中的无用信息得到另一类故障模式,由样本空间映射成数据空间。在数据空间上,通过某种变换(如对模式特征矢量进行量化、压缩等)使其有利于故障诊断。

b. 特征提取: 对要诊断的对象从获得的数据来看, 一般可看作一组时间序列。通过对该时间序列的分段采样, 可以将输入数据映射成样本空间的点。这些数据可能包含故障的类型、程度和位置等信息。但从样本空间看, 这些特征信息的分布是变化的, 因此, 一般不能直接用于分类, 需经合适的变换来提取有效的故障特征。而所提取的这些特征对于设备的参数应具有不变性。常用特征提取方法有: 傅立叶变换、小波变换、分形维数等。

c. 网络分类器: 常用于故障诊断分类的神经网络有 BP 网络、双向联想记忆 (BAM) 网络、自适应共振理论 (ART)、B 样条网络等。

神经网络的故障诊断方法应用领域也非常广泛: 如美国“旅行者”号深空探测器通讯系统故障诊断系统 (SHARP), 以及国产某型防空导弹结构故障诊断。神经网络具有从样本进行学习、归纳、推广和很强的自适应能力, 是一种很有前途的方法。但同时神经网络存在着限制其应用的缺点, 如神经网络结构选择及训练样本选择缺乏系统可靠的依据, 网络训练收敛速度比较慢, 对复杂的系统有时缺乏有效的学习算法。

4.5 基于支持向量机的故障诊断方法

神经网络受到网络结构复杂性和样本复杂性的影响较大, 并且容易出现过学习或低泛化能力。Vapnik 在 1995 年提出一种新型的机器学习方法——支持向量机 (SVM, support vector machines)。支持向量机具有完备的统计学习理论基础和出色的学习性能, 已成为机器学习界的研究新热点, 并在很多领域都得到了成功的应用。特别是对于小样本问题, 支持向量机具有良好的学习泛化能力。

采用支持向量机 SVM 对数据进行分类, 是通过寻找一个满足分类要求的最优超平面分割训练集, 并且使训练集中的点距离该分割平面尽可能地远, 即寻找一个分割的超平面, 使离超平面最近的向量与超平面之间的距离是最大的, 其两侧的空白区域 (Margin) 最大。

SVM 是二元分类器, 将 SVM 应用于装备系统智能故障诊断, 必须由二元的 SVM 构造多元分类器。这里采用 “one-against-one” 方法构造多元分类器: 对 N 元分类问题建立 $N(N-1)/2$ 个 SVM, 每两类之间训练一个 SVM 将两类分开, 然后在测试新样本时, 使用成对的 SVM 进行鉴别比较, 每次产生一个优胜者, 在优胜者间进行竞争淘汰, 直至最后仅剩唯一一个优胜者, 从而获得测试样本的所属类别。这种方法单个 SVM 训练规模较少, 训练数据均衡, 同时易于

扩展。

采用模块方式建立基于支持向量机的系统智能故障诊断模型。将整个故障诊断模型分为四个序列链接的独立模块。采用独立模块后, 既可以顺序分析, 又可以根据诊断需要跳过一些模块, 提高故障诊断的效率。第一个模块是数据初始化模块, 为了减少故障样本中不同参数绝对数值大小对支持向量机诊断的影响, 需对样本的各参数进行归一化预处理。第二个模块是智能学习模块, 通过智能学习模块对故障样本进行学习, 获得不同故障类型的最优超平面。第三个模块是故障诊断模块, 即输入新的装备状态样本到模型中, 对系统进行故障识别。第四个模块是新故障模块, 即当系统出现新的故障形式和状态时, 可输入到模型中, 获得新的最优超平面, 提高故障诊断的跟踪识别能力。

5 结束语

防空导弹在国家防御体系中担负着重要角色, 如果因为故障导致任务失败或推迟, 将会造成巨大的损失。新型防空导弹系统是一套高度复杂的电子系统, 涉及机械、微波、电子、计算机等诸多领域, 单凭人工进行故障诊断具有相当难度。因此防空导弹智能故障诊断技术的研究和应用, 对提升国家防御能力具有重要意义。

参考文献

- 1 余浩章, 陈新华. 基于故障树的故障诊断推理新方法. 上海海运学院学报, 2001, 22(3): 65~67
- 2 杨晓川, 谢庆华, 何俊, 等. 基于故障树的模糊故障诊断方法. 同济大学学报, 2001, 29(9): 1058~1060
- 3 金星, 洪延姬, 武江涛, 等. 基于故障树的智能型故障诊断系统. 宇航学报, 2001, 22(3): 111~113
- 4 于海文, 等. 基于故障树分析法的故障诊断专家系统. 中国空间科学技术, 1998(1): 37~44
- 5 陈建勤, 席裕康, 张钟俊. 模糊规则的学习及其在非线性系统建模中的应用. 自动化学报, 1997, 23(4): 533~537
- 6 杨杰, 张晓莉, 郭英凯. 基于模型的故障诊断中的模糊建模和推理. 上海交通大学学报, 1999, 33(4): 418~421
- 7 胡昌华, 张晓明. 基于自适应模糊系统的非线性系统故障诊断. 西北轻工业学院学报, 1998, 16(4): 34~37
- 8 张绪锦, 韩江洪. 模糊理论在雷达故障诊断中的应用. 系统工程与电子技术, 2001, 23(2): 90~93