

文章编号:1002-0640(2010)01-0001-05

## 故障预测技术综述<sup>\*</sup>

左宪章<sup>1</sup>, 康 健<sup>1</sup>, 李 浩<sup>2</sup>, 唐力伟<sup>1</sup>

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003, 2. 63880 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:**把握新军事变革机遇, 加快信息化建设步伐, 对军事装备进行有效的质量监控和故障预测是技术保障的重要内容。阐述了故障预测技术, 系统地介绍了现有的、比较有代表性的故障预测技术方法, 并叙述了其优缺点; 最后重点对故障预测技术的发展前景进行了展望, 指出了该研究领域当前需要进一步研究的问题和发展方向。研究故障预测技术对提高装备的维修和保障能力具有十分重要的意义。

**关键词:**故障预测, 人工智能, 支持向量机, 无线传感网络

**中图分类号:**TP206+.3

**文献标识码:**A

## Overview of Fault Prediction Technology

ZUO Xian-zhang<sup>1</sup>, KANG Jian<sup>1</sup>, LI Hao<sup>2</sup>, TANG Li-wei<sup>1</sup>

(1. Ordnance Engineering Collage, Shijiazhuang 050003, China, 2. Unit 63880 of PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In order to seize the opportunity for new military reformation and accelerate the pace of informatization, it is necessary to monitor quality and predict fault for military equipments, and it is also the important content of technique support. This paper briefs the fault prediction technology and its potential benefits, and systematically introduces the existing and typical fault prediction technologies, including their advantages and disadvantages. Finally, problems to be further develop and trend for this research area are provided. A full and deep study on fault prediction technology is very important to the maintenance and guarantee of equipment.

**Key words:** fault prediction, artificial intelligence, SVM, wireless sensor networks

## 引 言

随着科学技术的快速发展, 现代装备的结构越来越复杂, 功能越来越完善, 自动化程度也越来越高。装备的不同部分之间互相关联, 紧密耦合, 使得复杂装备的故障特征具有不确定性、非线性、并发性, 一旦发生故障, 不仅会造成重大的经济损失, 而且可能危及人身安全、造成环境污染, 带来严重的社会问题<sup>[1]</sup>。这就要求进一步提高装备系统的安全性, 确保装备安全可靠地运行。

## 1 故障预测技术

故障预测技术是比故障诊断<sup>[2]</sup>更高级的维修保养形式, 是一门涉及机械、电子、计算机、通信、控制以及材料等多学科综合的新兴边缘学科。它以当前装备的使用状态为起点, 结合已知预测对象的结构特性、参数、环境条件及历史数据, 对装备未来的故障进行预测、分析和判断, 确定故障性质、类别、程度、原因及部位, 指出故障发展趋势及后果, 以便预先消除故障, 保证训练和作战任务的顺利完成。

发展故障预测技术, 首先可确保装备有充裕的无故障工作时间, 确保作战任务的圆满完成, 这对提高部队的战斗力和保障效率至关重要。其次, 发展故障预测技术对于改革现行的装备管理和维修制度也具有重要作用。现在装备保障普遍采用的是视情维修, 它可避免因过剩维修而造成资源的浪费, 也可防止因不足维修而导致事故的发生。而准确的故障预测是视情维修的前提。发展故障预测技术能为视情

收稿日期: 2008-11-20

修回日期: 2008-12-25

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(50475053); 军械工程学院科学研究基金(YJJXM0637); 军队科研计划基金资助项目

作者简介: 左宪章(1963-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 教授, 研究方向: 故障诊断与无损检测。

维修或其他先进的维修理念提供科学的决策依据,最大限度地减少装备的维修次数和维修范围,保证其安全可靠地运行,实现装备管理的科学化和规范化,提高武器装备的保障水平和部队的战斗力。

## 2 故障预测技术的研究现状

近年来,故障预测技术得到了长足的发展。现有的故障预测技术有很多种<sup>[3,4]</sup>,本文就以下四个方面来介绍故障预测技术的研究现状。

### 2.1 统计预测技术

#### 2.1.1 基于回归分析法的预测技术

回归预测是根据历史数据的变化规律,寻找自变量与因变量之间的回归方程式,确定模型参数,据此作出预测。

回归分析法所用技术比较成熟,预测过程简单。但回归模型误差较大,外推特性差。该方法还要求样本量大且有较好的分布规律。当预测的长度大于已有的原始数据长度时,采用该方法进行预测在理论上不能保证预测结果的精度。另外,可能出现量化结果与定性分析结果不符的现象,有时也难以找到合适的回归方程类型。

#### 2.1.2 基于时间序列分析法的预测技术

时间序列分析法是把预测对象的历史数据按一定的时间间隔进行排列,构成一个随时间变化的统计序列,建立相应的数据随时间变化的变化模型,并将该模型外推到未来进行预测。

时间序列分析法所需历史数据少、工作量少,但它要求影响预测对象的各因素不发生突变,因此,它适用于序列变化比较均匀的短期预测情况,不适合于作中长期预测<sup>[5]</sup>。

#### 2.1.3 主成分分析法

主成分分析是研究变量和样本间相关性的一种多元统计方法,它是通过少数几个主分量(即原始变量的线性组合)来解释多变量的方差。

主成分分析使得在研究复杂问题时可以只考虑少数几个主成分,却不至于损失太多信息,从而更容易抓住主要矛盾,揭示事物内部变量之间的规律性,同时使问题得到简化,提高分析效率。然而,主成分分析法对极端值及缺失值非常敏感,而极端值与缺失值会带来残缺或错误的分析结果。

### 2.2 数学预测技术

#### 2.2.1 基于模糊理论的预测技术

模糊理论是用精确的理论方法来解决经典理论所不能解决的、在人脑中大量存在的、非确定性语义及模糊概念的问题,还能克服由于预测过程本身的不确定性、不精确性以及噪声等所带来的困难。目前主要有三种基本预测思路:一是基于模糊关系及合

成算法的预测;二是基于模糊知识处理技术的预测;三是基于模糊聚类算法的预测。

模糊预测在处理复杂系统的时滞、时变及非线性方面,显示出它的优越性。但在模糊预测中,由于静态知识库无法反映装备零部件的失效过程,使得故障预测系统的知识表达不具有时间参数,没有实时控制的特性,从而削弱了此方法的实用性,需要深入研究动态知识库的建造技术。

#### 2.2.2 基于灰色理论的预测技术

灰色预测提供了在贫信息情况下求解系统问题的新途径<sup>[6]</sup>。灰色理论将一切随机变量看作是在一定范围内变化的灰色变量,通过对灰色变量进行数据处理,将杂乱无章的原始数据整理成规律性较强的生成数据来加以研究。在对模型的精度和可信度进行校验并修正后,即可用来进行预测。

灰色预测模型是一个指数函数,如果预测量是以某一指数规律发展的,则可期望得到较高精度的预测结果。灰色预测可用于故障的短期预测和长期预测。但对于长期预测,灰色预测方法精度不高。

### 2.3 智能预测技术

#### 2.3.1 基于神经网络的预测技术

神经网络预测首先选取若干历史数据序列作为训练样本,然后构造适宜的网络结构,用某种训练算法对网络进行训练,使其满足精度要求后进行预测。故障预测的神经网络主要以两种方式实现预测功能:一是以神经网络作为函数逼近器,对装备工况的某参数进行拟合预测;二是考虑输入输出间的动态关系,用带馈连接的动态神经网络对过程或工况参数建立动态模型进行故障预测。

神经网络具有较强的非线性映射能力,能逼近任意非线性函数,因而能较好地反映出装备实际工作状态的发展趋势与状态信号之间的关系<sup>[7]</sup>。另外,神经网络能进行多参数、多步预测,动态自适应能力强,适合非线性复杂系统的智能预测。但它也存在难以对所得结果作出合理解释、网络训练时间较长、输入变量和隐含层数及节点数选取困难、极易陷入局部最小值等缺点。尽管存在着上述缺点,应该看到神经网络为预测技术的发展开辟了一条新的道路,其发展前景是不容置疑的。

#### 2.3.2 基于专家系统的预测技术

专家系统预测技术由于采用了专家知识,从而具有了专家的丰富经验与判断能力,并能对用户的提问和答案的推理过程做出解释<sup>[8]</sup>。在中长期预测中,能够对未来的不确定性因素、各预测自身对象发展的特殊性以及各种可能引起预测对象变化的情况加以综合考虑,从而得到较好的预测结果。

专家系统预测技术主要用于那些没有精确数学

模型或很难建立数学模型的复杂系统,特别在非线性系统领域被认为是一种很有前景的方法。然而,一个实用的预测专家系统的研制需要较长时间原始资料的积累和模型修正,开发周期长。另外,专家的知识是经过大量实践而形成的,且未能形成统一的知识标准,有可能导致在综合各个专家知识时存在着偏差和失误。

### 2.3.3 基于遗传算法的预测技术

基于遗传算法故障预测的主要思想是利用遗传算法的寻优特性,搜索故障判别的最佳特征参数的组合方式,将信号特征参数的公式转化为遗传算法的遗传子,采用树图来表示特征参数及其最佳组合,得到优化的故障特征参数表达式,从而进行故障的准确预测,其预测精度较高。

遗传算法用于故障预测的主要优点是群体搜索策略和群体中个体间的信息交换,搜索不依赖梯度等高阶信息,同时还具有算法简单、通用、鲁棒性强等特点<sup>[9]</sup>。但也存在着一些缺陷,如早熟现象,即未成熟收敛;局部搜索能力弱,易陷于局部最优点;随机性大,容易在迭代过程中破坏群体中的优秀个体,从而导致收敛速度减慢;计算参数均是根据经验确定,很难找到最确切的值等。

### 2.3.4 基于多 Agent 的并行预测技术

在多 Agent 预测模型中,为综合不同推理机制的优势,把系统中的各 Agent 设计为异构。各个预测 Agent 具有相关的领域知识,并且具有专家水平的问题求解能力<sup>[10]</sup>。各 Agent 分别利用各自不同的知识库和推理机制对同一问题进行并行推理、独立求解,求解的最后结果在决策 Agent 中生成。

基于多 Agent 的故障预测方法代表了最新的工程问题求解规范,不仅包含了传统的浅知识模型,而且还具有描述系统结构和功能等深层次预测知识的能力,克服了传统模型局限性、脆弱性、弱解释能力等缺陷,将定性与定量推理有效地结合在一起。另外,基于多 Agent 的系统可以降低软件和硬件的费用,提供更快速的问题求解规范,具有良好的发展前景。

## 2.4 信息融合预测技术

### 2.4.1 优化组合预测技术

由于事物的两面性,单一的预测方法在具有各自优点的同时本身也存在一些不可避免的缺陷。再者,从信息的利用方面来说,任何单一的预测方法在利用了部分有用信息的同时也抛弃了其他一些有用的信息。为了扬长避短,尽可能地改善系统的预测性能,提高预测精度,有必要将对同一问题的不同预测模型按一定方式进行组合。这也就是所谓的组合预测理论。

组合预测方法的核心问题是如何确定各项预测方法在组合预测中的权重<sup>[11]</sup>。目前常用的确定组合预测权重系数的方法计算过于复杂,且多为定权系数。因此人们开始着手研究能够自适应地改变权系数的方法,即依据各项预测模型对预测结果的不同影响,动态确定组合预测模型的权系数。虽然它很好地解决了权重系数的确定问题,但是由于变权重组合预测方法的权重是随时间变化的函数,所以确定其形式就显得更加困难。

### 2.4.2 D-S 证据理论信息融合预测技术

D-S 证据理论是针对事件发生后的结果(证据)探求事件发生的主要原因(假设),是一种融合主观不确定性信息的有效手段。在装备故障预测中,若干可能的潜在故障产生一系列相应的故障征兆,每个故障征兆下各潜在故障都可能存在一定的发生概率,根据融合后的故障征兆属于各类潜在故障的信度函数和一定的判定准则来确定潜在故障类型<sup>[12]</sup>。

证据理论具有比较强的理论基础,既能处理随机性所导致的不确定性,又能处理模糊性所导致的不确定性,并能不同层次上组合证据。但是,证据理论具有潜在的指数复杂度,特别是在推理链较长时,使用证据理论很不方便。

### 2.4.3 基于多传感器信息融合的预测技术

多传感器信息融合预测技术主要是根据装备正常工作与异常工作时各种特征参数的变化,通过选择不同的传感器获取不同的特征信息<sup>[13]</sup>,利用小波分析、频谱分析、功率谱分析等现代信号处理方法提取被测数据特征,然后对这些信息进行数据、特征和决策融合,最终实现对装备故障的预测、定位和排除。

基于多传感器数据的信息融合在提高整个预测系统的效率及精度上有显著优势。然而,多传感器信息融合和传感器属性以及应用目标有密切关系,它是一个复杂的不确定性信息处理过程,在理论建模和融合方法上有相当难度,有许多技术问题尚待进一步解决。

## 3 故障预测技术的发展趋势

### 3.1 集成智能故障预测技术

现有的单一智能预测技术对机器系统依赖性强,即每一种新机器都需要一组新规则、出现异常征兆时,由于找不到最佳匹配,会造成误诊或漏诊,导致严重后果的发生、难以实现语言变量与模糊数之间的转换、对于知识的隐式表示导致解释能力差,使用户对其预测行为理解困难等问题。依靠单一智能技术的故障预测已难以满足复杂装备故障预测的全部任务要求。通过将多种故障预测方法有效地集成

在一起,可以克服各预测方法的局限性,充分发挥各种方法自身的优点,能更好地表示对象的故障预测领域知识,增强机器学习,提高预测系统的智能性和预测性能,有效地解决复杂系统和过程的预测问题。

### 3.2 智能 BIT

随着专家系统、神经网络、机器学习、知识发现等智能理论和技术在应用中逐步成熟,这些智能理论和方法开始逐渐渗入到机内测试(Built-in-test)技术之中形成了智能 BIT 技术。智能 BIT 就是将包括专家系统、神经网络、模糊理论、信息融合等在内的智能理论应用到 BIT 的设计、检测、诊断、预测、决策等方面,综合考虑 BIT 输出、温度及振动等环境信息、BIT 历史信息和装备动态历史等信息,扩大了 BIT 故障预测的数据信息来源,提高 BIT 的综合效能,从而降低装备全寿命周期费用的理论、技术和方法。在装备系统的故障分析、故障监测和预测方面,BIT 作为一种重要故障监测和预测手段,正在发展成为一个集状态监测、故障预测、故障隔离等功能于一身的综合系统。下一代 BIT 系统将会是一个集监测、预测、隔离、定位、控制、保护于一体的小型化、智能化、芯片化、模块化、通用与专用结合的系统,它不但能提高装备的可测性和可靠性,而且能简化维修,降低费用,应用前景非常广阔。

### 3.3 基于支持向量机的故障预测技术

支持向量机(Support Vector Machine-SVM)是人们根据统计学理论提出的一种机器学习方法<sup>[14]</sup>。它是建立在统计学理论 VC 维理论和结构风险最小原理基础上的,综合考虑了样本误差和模型的复杂度,以及实际风险的两个决定因素:经验风险和置信范围,有效地解决了复杂性与推广能力之间的矛盾。

SVM 应用于故障预测的两大优势在于:① 小样本学习。统计学理论致力于寻求小样本情况下学习问题的最优解,而不需要利用样本数趋于无穷大的渐进性条件。SVM 是在统计学理论框架的基础上发展起来的一种新的机器学习方法,适合于小样本决策。而工程系统故障样本的获取又有一定的困难,解决有限样本的故障预测问题体现出了 SVM 实际应用的优越性。② 学习能力强。SVM 基于结构风险最小化原则,表现出了很强的学习能力和泛化能力,可以很好地克服局部极小点、维数灾难以及过拟合等传统机器学习方法所不可避免的问题。所以说,SVM 能够在有限特征信息情况下,最大限度地发掘数据中隐含的分类知识,对未来的故障信息进行状态预测,提高系统的整体预测性能。

SVM 的应用为故障预测向智能化方向发展提供了一个新的途径,SVM 所具有的优良特性将会使

其成为复杂系统故障预测的一个强有力的工具。

### 3.4 智能故障预测系统

智能故障预测的下一步发展应该是智能模拟——预测系统。智能模拟的核心是基于数据、信息的分析、综合,提供模拟结论。智能预测的核心是基于知识的推理,作出预测决断。

智能模拟要充分利用虚拟现实技术。虚拟现实技术是人们通过计算机对复杂数据进行可视化操作以及交互的一种全新的方式。应用该技术后,用户、计算机和控制对象被视为一个整体,通过各种直观的工具将信息进行可视化,用户直接置身于这种三维信息空间中自由地操作、控制计算机。随着虚拟现实技术的进一步发展及其在智能故障预测系统中的广泛应用,它将给智能故障预测系统带来一次技术性的革命。

在智能预测方面,由于原先对预测问题只是考虑基于知识的推理,对动力、统计预测方法等只是综合应用了它的预测结果,所以,要进一步实现各种预测方法在知识这公共基点上的结合,扩展知识表示和知识利用的内容,加强机器学习,提高预测效能。

### 3.5 基于无线传感网络的远程分布式智能故障预测系统

远程分布式故障预测是计算机科学、通信技术与故障预测技术相结合的一种故障预测方式,是在网络技术不断成熟与发展的基础上产生的一种依托于故障预测技术和网络技术相结合的产物,这种预测模式能对多台异地装备同时进行在线预测。它有两个显著的优点:① 资源共享。建立远程分布式智能故障预测系统,可以实现异地多专家对同一装备的协同预测以及多台装备共享同一预测系统,有利于预测案例的积累及资源共享,以弥补单个预测系统领域知识的不足,提高预测的效率、精确性及智能化水平。② 实时预测。通过网络将装备、专家、预测系统结合为一体,不受地域限制,实现对复杂装备故障的实时预测,同时具有很高的社会效益和经济效益。

在这里,特别需要关注无线传感网络这一关键技术。无线传感网络能够实时监测、感知和采集网络分布区域内的各种环境或监测对象的信息,并对这些信息进行处理,从而获取详尽而准确的信息<sup>[15]</sup>。无线传感网络是当前国际上备受关注的、由多学科高度交叉形成的新兴前沿研究热点领域。

## 4 结 论

现代装备向着数字化、电子化、信息化方向发展,利用电子信息交互实现装备故障预测的自动化,以及使用与维护一体化进程已成为世界各国军方关

注的焦点。同时,由于装备科技含金量增多,结构变得越来越复杂,装备维修体制也随之而改革。现在先进的维修理念是基于状态的维修(CBM)和E-维护,而故障预测技术是其基础。因此,故障预测技术应借鉴和引入相关前沿学科的新思维和新方法,发展结合传统的物理模型和智能分析技术,并能处理数字信息、符号信息及知识信息的集成型无线传感网络远程分布式智能故障预测技术,对于实现先进的维修理念最有利。而在此基础上发展起来的寿命预测,将引领一个装备维修保障新时代的到来。

#### 参考文献:

- [1] 徐章遂,房立清,王希武,等.故障信息诊断原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [2] Liu C S, Hu S S. Intelligent Nonlinear Fault Diagnosis based on State Estimator [J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 557-561.
- [3] Jin L, Zhang H C. Method of Intelligent Fault Diagnosis [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(5): 657-661.
- [4] Hassan A E, Holt R C. The Top Ten List: Dynamic Fault Prediction[C]//ICSM'05, 2005: 263-272.
- [5] Kjolle G H, Gjerde O, Hjartsjo B T, et al. Protection System Faults: a Comparative Review of Fault Statistics [J]. PMAPS, 2006: 1-7.
- [6] Fenton W G, McGinnity T H, Maguire L P. Fault Diagnosis of Electronic Systems using Intelligent Techniques: a Review [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part C: Applications and Reviews, 2001, 31(3): 269-281.
- [7] Gui W H, Yang C H, Teng J. Intelligent Fault Diagnosis in Lead-zinc Smelting Process [J]. International Journal of Automation and Computing, 2007, 04(2): 135-140.
- [8] 薛子云,杨江天,朱衡君.机械故障预测模型综述[J].机械强度,2006,28(S):60-65.
- [9] 曾声奎,Michael G P,吴 际.故障预测与健康管理的(PHM)技术的现状与发展[J].航空学报,2005,26(5):626-632.
- [10] 曹立军,杜秀菊,秦俊奇,等.复杂装备的故障预测技术[J].飞航导弹,2004(4):23-27.
- [11] 朱大奇.基于D-S证据理论的数据融合算法及其在电路故障诊断中的应用[J].电子学报,2002,30(2):221-223.
- [12] 陈敏泽,周东华.动态系统的故障预报技术[J].控制理论与应用,2003,20(6):819-823.
- [13] Cheng C S, Hsu Y T, Wu C C. Grey Neural Network [C]//IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, 1998: 2433-2442.
- [14] Kastris M. Forecasting Combining with Neural Networks [J]. Journal of Forecasting, 1996, 15(1): 49-61.
- [15] Gelgele H L, Wang K S. An Expert System for Engine Fault Diagnosis: Development and Application [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1998, 9(6): 539-545.
- [16] Chen J H, Guo Y Z. Application of GM Fuzzy Optimal Method in Fault Forecasting for a Few Sample Mechanical Systems [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(19): 1658-1660.
- [17] Zhao R Z, Meng F M, Zhang Y Y. Study of Grey Prediction Modeling for Vibration Development of a Mechanical System [J]. Mechanical Technology, 2004, 23(3): 256-259.
- [18] Zhang Z D, Hu S S. Neural Network Immune Ensemble based Fault Prediction for Nonlinear Time Series [J]. Journal of Southeast University, 2004, 34(11): 15-19.
- [19] Cheng H T, Huang W H, Jiang X W, et al. Neural Network Model based Fault Prediction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(4): 162-164.
- [20] Huang D R, Huang X Y. The Study of Fault Predict for Decision System based on Mahalanobis Distance and Neural Network [C]//DCDIS 4th International Conference on Engineering Applications and Computational Algorithms. Guelp University, Ontario, Canada, 2005: 400-405.
- [21] 赵海东,缪旭东,吕世聘.基于神经网络的军用飞机故障预报系统研究[J].系统工程与电子技术,2003,25(7):894-896.
- [22] 刘 大,有杨鲲,陈建中. Agent 研究现状与发展趋势[J].软件学报,2000,11(3):315-321.
- [23] 李凌均,张周锁,何正嘉.基于支持向量机的机械设备状态趋势预测研究[J].西安交通大学学报,2004,38(3):230-233.
- [24] Yang J Y, Zhang Y Y, Zhao Y Z. Application of Support Vector Machines in Trend Prediction of Vibration Signal of Mechanical Equipment [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 950-953.
- [25] Ananthram S, Zhao Q, Hong Y W, et al. Wireless Sensor Networks: Signal Processing and Communication Perspectives [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [26] Wang X, Wang S. Collaborative Signal Processing for Target Tracking in Distributed Wireless Sensor Networks [J]. J. Parallel Distrib. Comput, 2007, doi: 10. 1016/j. jpc. 2007-02-001.
- [27] Zuo X Z, Kang J, Wang J B, et al. Research on Intelligent Fault Diagnosis Model for Complicated Equipment [C]//Proceeding of 7th International Symposium on Test and Measurement, 2007: 2485-2488.