

故障预测技术发展与分类

马 硕¹, 焦现炜¹, 田柯文¹, 吕世乐¹, 赵阳¹, 郑善军²

(1. 72465 部队, 济南 250022; 2. 72428 部队, 山东 文登 264419)

摘要: 结合大型复杂武器系统装备特点、装备保障现状, 探讨了故障预测技术发展对部队战斗力生成的必要性, 研究了故障预测技术在国内外研究发展情况和趋势, 详述和对比了故障预测技术的分类方法, 总结了不同预测方法的优缺点, 并对故障预测技术的发展趋势进行了初步探索和展望。

关键词: 故障预测; 视情维修; PHM; 灰色预测; 数据驱动; 回归预测

中图分类号: TP206+.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)02-0092-04

The Development and Classification of Failure Prediction Technology

MA Shuo¹, JIAO Xian-wei¹, TIAN Ke-wen¹, LV Shi-le¹,
ZHAO Yang¹, ZHENG Shan-jun²

(1. The PLA 72465, Jinan 250022, China; 2. The PLA 72428, Wengdeng 264419, China)

Abstract: Combined with the characteristics and status quo of large complex weapon systems, this paper discusses the necessity of developing fault forecasting technology for forming troop strength, and studies at the development situation and trends in domestic and overseas study. After detailing the methods of classifying fault forecast technologies, the article summarizes the advantages and disadvantages of different forecasting methods, and then makes a preliminary exploration and forecasts the trend of fault forecasting technology.

Key words: failure prediction; condition-based maintenance; PHM; grey prediction; data driven; regression forecasting

随着高新技术发展,大型复杂武器系统装备部队,大大提高了部队装备水平和战斗力,但新装备结构更加复杂,自动化程度更高,对装备维修保障人员提出了更高的要求。部队技术检查多针对装备直观的、外在的技术性能状况进行检查,难以判断在执行任务中是否发生故障,又加之大型复杂武器系统和老装备相比,战场抢修需要的时间更长,抢修难度更大。因此研究故障预测技术,变“事后诊断维修”为“提前预测维护”,对武器装备的维修保障来说,有更实用的价值。

本文分析了发展故障预测技术的必要性及意义,结合国内外故障预测技术发展,详述和对比了不同故障预测技术方法,并对故障预测技术的发展趋势进行了初步探索和展望。

1 故障预测技术

1.1 定义

故障预测技术是比故障诊断更高级的维修保障形式,是一门涉及机械、电子、材料、控制、通信以及计算机技术和人工智能等多学科综合的新兴边缘学科^[1]。

故障预测是由技术人员利用已有的知识,采用适当的方法,预测现有装备未来任务段内何时会出现故障、出现什么故障,以便采取及时有效的预防措施实现预知维修,保证训练和作战任务所需的无故障工作时间^[2]。它以当前武器装备的使用状态为起点,利用监测参数、实验数据等各种信息,

收稿日期: 2012-12-25

作者简介: 马硕(1990—),男,助理工程师,主要从事故障诊断与预测、装备保障研究。

结合已知预测对象的结构特性、参数、环境条件及运行历史(包括运行记录和曾发生过的故障及修复记录),对装备未来任务段内可能出现的故障进行预报、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,向用户及时提出警告,借助相关推理技术评估部件或系统的未来健康状态或剩余使用寿命,以便及时在任务之前消除故障,保证训练和作战任务的顺利完成。

1.2 研究的必要性与意义

长期以来在维修技术保障方面,把大量的精力都投入到维修技术手段的革新和维修器材的研制上,然而这些技术研究大多主要围绕着如何找出产生故障的原因和如何修复故障,只能保证装备能走得动、打得响,但能走多远、正常工作多久却无法预知,加之近年来因电子系统的关键模块或元件故障而引起的灾难性事故时常发生,导致大量的人力、物力与财力的损失,各国政府迫切需要能够开展基于故障预测与健康管理的“视情维修^[3]”,变定期预防维修和事后维修为视情预知维修,以此避免传统“定时维修”的维修过剩或“事后维修”造成的巨大损失。

故障预测使得设备维护人员能够提前预知设备的健康状态和故障的发生,从而有效地降低故障风险、节约保障资源、减少经济损失。具体说来,大力发展故障预测技术能指导装备进行视情维修,既可减少因过剩维修而引起的费用上升,也可防止因不足维修而导致事故的发生,可大量减少避免装备在使用过程中发生重大恶性事故,减少战场装备报废和人员伤亡。此外对研究我军现行的装备维修和管理制度也有重要作用。

2 国内外研究现状

正是故障预测技术给维修费用带来的明显效益,在军用装备和工业用大型机械、电子系统等领域,故障预测技术成为研究热点。从20世纪70年代起,故障诊断、故障预测、基于状态的维修或称视情维修(CBM)、健康管理等系统(PHM)逐渐在工程中应用^[4]。视情维修要求系统自身具有对其故障进行预测并对其健康状态进行管理的能力,可以实现“经济可承受性”的目标,也由此产生了故障预测与健康管理的(PHM)概念^[5]。目前在国外尤其是美国,各种PHM系统已经逐步得到应用。20世纪70年代中期的A-7E飞机的发动机监控系统(EMS)成为PHM早期的典型案例^[6]。美军先后开发应用了飞机状态监测系统(ACMS)、发动机监测系统(EMS)、综合诊断预测系统(IDPS)以及海军的综合状态评估系统(ICAS)等^[7-12]。这些与故障预测技术相关联的系统主要表现在不同领域其具体应用的技术和方法的不同,但在目前研究机构还没构建出通用的故障预测框架,工业中也鲜有成熟的预测系统。

我国开始对装备故障诊断和预测技术的研究要比国外晚约十年,而且在很大程度上都是借鉴国外的先进模型或算法。在国内,北航可靠性工程研究所较早地开展了PHM系统方法和技术应用方面的相关研究^[13]。与故障预测相关的

理论研究文献逐年增多,文献[4]中从PHM的人-机-环完整性认知模型出发,对PHM技术进行了分类和综述。程进军等^[14]采用实数编码方式和自适应的交叉率、变异率改进遗传算法,并将改进遗传算法用于神经网络的权重学习得到遗传神经网络,改善了BP网络预测精度。李万领等^[15]对灰色模型进行了改进,以某制导雷达系统的波束控制中某电源组合为例采集电压信号数据,得到精度较高的预测结果。文献[16]中,作者分析了粒子滤波在故障预测中常出现的离子退化样本贫化等问题,提出了一种基于粒子滤波的故障诊断与预测结构,同时给出相应环节的实现算法。文献[17]中,作者用最小二乘支持向量机回归算法的基本原理,结合复杂多尺度方法建立最小二乘支持向量机预测模型,对某型机载飞机的陀螺平台状态数据进行监测,实现对设备状态趋势的预测和故障预报。结果表明采用复杂多尺度最小二乘支持向量机模型进行状态监测是有效的。文献[18]中针对样本数据量较小条件下的故障预测问题,将灰色预测与相关向量机回归预测相结合,实验结果表明,模型的预测性能优于传统的灰色预测模型。张光轶等^[19]根据灰色建模不需要寻找数据的概率分布和统计规律的优势,给出了一种灰色预测算法步骤,并将其应用于某型装备故障预测中加以分析。结果表明该方法不仅可行,且预测精度较高,具有一定的军事应用价值。文献[20]中研究了一种兼顾失效与良好状态下数据的神经网络方法。该方法考虑了良好状态下数据中的有用信息,获得了较好的效果。但是我国的这些研究数据多在实验室阶段,能应用在军事装备或工业中的不多。

3 故障预测方法与分析

现有故障预测方法包括从简易历史故障数据模型到高度专业的物理模型。根据预测方法的不同类型,所需要的信息包括:工程模型和数据、失效历史、历史使用条件、当前状态、可识别故障模式、失效变化曲线、维修历史、系统退化及失效模式^[21]。从目前研究工作综合来看,故障预测方法分类很多,最常见的可以分为:①基于模型的故障预测技术;②基于数据驱动的故障预测技术;③基于概率统计的故障预测技术。

3.1 基于模型的故障预测技术

基于模型^[22]的故障预测方法假定可以获得对象系统精确的数学模型。这种方法通过对功能损伤的计算来评估关键零部件的损伤程度,通过建立物理模型或随机过程建模,用来评估部件剩余寿命。通常情况下,对象系统的故障特征通常与所用模型的参数紧密联系,随着对设备或系统故障演化机理研究的逐步深入,可以逐渐修正和调整模型以提高其预测精度^[23]。

灰色模型^[23-25](Grey Model)是1952年由我国邓聚龙教授提出,是目前常用的预测模型之一,通过一阶微分方程揭示数列的发展规律。灰色预测按灰色系统理论建立预测模型,根据系统的普遍发展规律,建立一般性的灰色微分方程,

通过对数据序列的拟合,求得微分方程的系数,从而获得灰色预测模型。该模型用于故障短期预测效果比较好。

基于滤波器的算法主要包括卡尔曼滤波器和粒子滤波器两种。卡尔曼滤波器^[26-28]基本思想是通过对含有噪声的观测信号的处理,得到被观测系统状态的统计估计信息。粒子滤波器^[16-27,28]方法通过非参数化的蒙特卡罗模拟方法来实现贝叶斯滤波,用样本形式对先验信息和后验信息进行描述。基于滤波器的方法要求系统模型已知,当模型比较精确时,通过比较滤波器的输出与实际输出值的残差,实时调整滤波器的参数,能够较好地估计系统的状态,同时,也能对系统的状态做短期预报。但一旦模型不准确,滤波器估计值就可能发生较大偏差。

3.2 基于数据驱动的故障预测技术

如果不同信号引发的故障数据或依据统计得来的数据集,难以确定准确的数学模型,在故障预测时容易造成过大偏差。装备在测试或传感器数据也能成为故障预测的一种手段。基于测试或者传感器数据进行预测的方法称为数据驱动的故障预测技术^[23]。

典型的基于数据驱动的故障预测方法有:人工神经网络、模糊系统和其他人工智能计算方法。数据驱动方法的具体划分如图1。

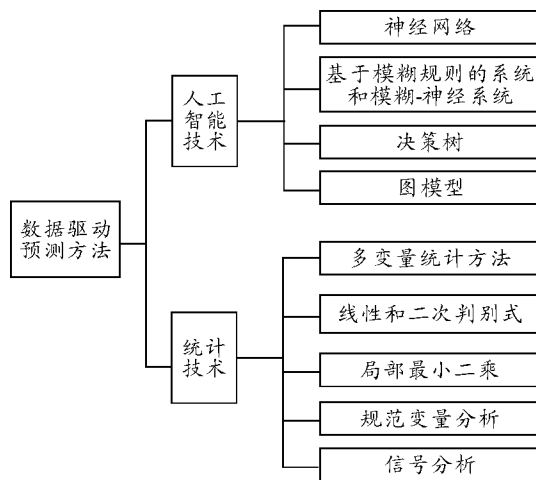


图1 数据驱动方法

人工神经网络^[28]具有模仿连续非线性函数的能力,并且能够从样本进行学习,因而在故障预测中得到了广泛的应用。人工神经网络通过样本的学习可以掌握系统规律,无需对测量信号作模型假设。由于神经网络具有很强的自适应学习能力,和非线性映射能力,适合于实现预测器的设计。但是神经网络训练时需要大量数据样本,且存在收敛速度慢、局部极小点、网络结构难以确定等不足。

支持向量机(SVM)^[28-31]是一种建立在统计学习理论的VC维理论和结构风险最小化原则基础上的机器学习方法。它针对小样本有很强的泛化能力,有效地克服了局部极小点、维数灾难以及过拟合等传统算法所不可避免的问题。

基于数据的故障预测技术不需要对象系统的先验知识,

以采集的数据为基础,通过各种数据分析处理方法挖掘其中的隐含信息进行预测操作,从而避免了基于模型和基于知识的故障预测技术的缺点,成为了一种较为实用的故障预测方法^[23]。

3.3 基于概率统计的故障预测技术

如果无法确定一个完整的动态模型或给出输入和输出之间的系统微分方程,那么可以通过从过去故障历史数据的统计特性角度进行故障预测,这种方法称为基于概率统计的故障预测方法。基于概率的故障预测方法包括时间序列预测法、回归预测法、模糊逻辑^[32]等。

时间序列预测法^[28,33,34]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模型,并将该模型外推到未来进行预测。也可以根据已知的历史数据拟合一条曲线,使得这条曲线能反映预测对象随时间变化的趋势。按照变化趋势曲线,对于未来的某一时刻,从曲线上可以估计出该时刻的预测值。此方法有效的前提是过去的发展模式会延续到未来,因而这种方法对短期预测效果比较好。

回归预测法^[28,35,36]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,据此做出预测。根据自变量的多少可以将回归问题分为一元和多元回归。按照回归方程的类型可分为线性和非线性回归。回归分析法的主要特点是预测过程简单,将预测对象的影响因素分解,考察各因素的变化情况,从而估计预测对象未来的数量状态。回归分析法要求的样本量大并且有较好的分布规律,当预测的长度大于占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。

通过对大量的工程产品和系统的可靠性分析,一般产品或系统的失效与时间数据趋势很好地服从威布尔分布,见图2。

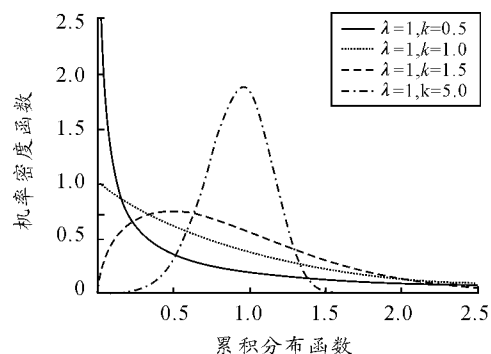


图2 威布尔分布示意图

4 故障预测技术发展趋势

随着高新技术的不断发展,武器装备和大型工业设备越来越复杂,自动化和集成化程度更高,故障的起因和征兆也更加错综复杂,这给故障预测带来的更大的挑战。从发展趋势看,故障诊断技术将在这几个方面进一步发展。

- 1) 不同预测技术相互融合;
- 2) 新的预测理论和分类方法运用到故障预测中;
- 3) 基于计算机的智能预测方法在未来会更加实用,并逐步提高预测效能;
- 4) 故障预测、状态管理技术、故障诊断共同发展,融为一体。

5 结束语

自 20 世纪 70 年以来,在各国政府、军队和工业界的广泛关注下,故障预测技术得到了很大的发展,在一些复杂装备和设备中得到了初步应用,故障预测技术给复杂装备提供了更新、更有效的维修保障办法,取得了很好的经济和国防效益。我国在这方面的研究和国外相比还仍有很大差距,所以展开故障预测分析与研究势在必行。

本文在广泛阅读相关文献的基础上,从大型复杂武器系统装备特点、装备保障现状入手,探讨了故障预测技术发展对部队战斗力生成的必要性、国内外研究发展情况和趋势,详述和对比了故障预测技术的分类方法,总结了不同预测方法的优缺点,并对故障预测技术的发展趋势进行了初步探索和展望,对故障预测技术的研究工作有一定帮助和启示。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王子玲,许爱强,杨智勇. 装备故障诊断和预测技术综述[J]. 火力指挥与控制工程,2008,33(增刊): 8-11.
- [4] 曾声奎,Michael G P,吴际. 故障预测与健康管理(PHM)技术的现状与发展[J]. 航空报,2005,26(5): 626-632.
- [5] 孙博,康锐,谢劲松. 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述[J]. 系统工程与电子技术,2007,27(10): 1762-1767.
- [6] Andy H. The Joint Strike Fighter (JSF) Prognostics and Health Management [C]//NDIA 4th Annual Systems Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.],2001.
- [7] Tumer, Bajwa A. A survey of aircraft engine health monitoring systems [J]. 35 A IAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit,1999.
- [8] Roemer M J, Kacprzynski G J. Advanced diagnostics and prognostics for gas turbine engine risk assessment [J]. IEEE,2000(6): 345-353.
- [9] Nickerson B, Lally R. Development of a smart wireless networkable sensor for aircraft engine health management [J]. IEEE,2001(7): 3255-3262.
- [10] Andrew S L, Green J. Future direction and development of engine health monitoring (EHM) within the united states airforce [R]. ADA347976F,1998.
- [11] 蒋世奇,古天祥. 发动机关键参数测量与状态监测系统[J]. 仪器仪表学报,2005,26(8增刊): 406-408.
- [12] Murphy B P. Machinery monitoring technology design methodology for determining the information and sensors required for reduced manning of ships [D]. Massachusetts Institute of Technology Master's thesis,2000.
- [13] 刘杨,伍德奎. 基于灰色理论的间断性需求备件预测方法[J]. 四川兵工学报,2011(4): 27-29.
- [14] 程进军,夏智勋,胡雷刚. 基于遗传神经网络的航空装备故障预测[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版,2011,12(1): 15-19.
- [15] 李万领,孟晨,杨锁昌,等. 基于改进灰色模型的故障预测研究[J]. 中国测试,2012,38(2): 26-28.
- [16] 龙凤,薛冬林,陈桂明,等. 基于粒子滤波与线性自回归的故障预测算法[J]. 计算机技术与发展,2011,21(11): 133-140.
- [17] 戴林超,吴琳丽,赵海娜,等. 基于最小二乘支持向量机的故障预测法[J]. 中南大学学报: 自然科学版,2009,40(Suppl. 1): 253-257.
- [18] 范庚,马登武,邓力,等. 基于灰色相关向量机的故障预测模型[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(2): 424-428.
- [19] 张光轶,苏艳琴,许爱强. 灰色模型在装备故障预测中应用分析[J]. 测控技术,2012,31(2): 20-22.
- [20] Zhigang Tian. A Neural Network Approach for Remaining Useful Life Prediction Utilizing both Failure and Suspension Data [C]//Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual. San Jose, CA: IEEE,2010.
- [21] 赵春雨,马伦,吕艳军,等. 基于状态维修过程中的故障预测问题分析[J]. 计算机与数字工程,2012,40(1): 129-131.
- [22] 朱大奇. 基于知识的故障诊断方法综述[J]. 安徽工业大学学报,2002,19(3): 197-204.
- [23] 彭宇,刘大同,彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(1): 1-9.
- [24] 黄大荣,黄丽芬. 灰色系统理论在故障预测中的应用现状及其发展趋势[J]. 火炮发射与控制学报,2009(3): 88-92.
- [25] 刘思峰,党耀国,方志耕,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 3版. 北京: 科学出版社,2008.
- [26] 陈雨,张颖伟. 基于卡尔曼滤波器的网络控制系统的故障检测[J]. 电气开关,2010(5): 18-20.
- [27] Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, et al. A tutorial on particle filters for on-line non-linear/non-gaussian bayesian tracking [J]. IEEE Trans Signal Process,2002,50(2): 174-188.
- [28] 故障预测方法综述[EB/OL]. [2012-07-20]. <http://wenku.baidu.com/view/6d8f5e06a6c30c2259019e9f.html>.

(下转第 116 页)

息一体化平台间的可靠数据传输。通常卫星中继通信不受通信距离和地理位置的限制,利于实现战略区域范围内数据链路组网。

2.2.2 数据格式转化和规范

建立一体化数据链系统,有效解决了在大的战场区域,前后方之间的统一协调问题。为了实现信息一体化要求,必须对各种侦查情报的数据格式进行规范,建立标准化数据元的共用报文格式及图像格式。同时对通信频率、数据波形及加密标准等都要进行统一规范。

由于无人机是远距离传输,因时延等因素影响,难免对目标探测有定位信息误差。情报终端需要通过加密设备将信息调制、加密、检错与纠错,将格式化信息编成统一标准的数据信号。在波形设计上可采用多种扩频抗干扰技术体制,以及纠错编解码、交织、自适应干扰抑制等其他非扩频抗干扰技术^[5]。

2.2.3 数据链系统抗干扰分析

对数据链通信而言,无任何方法或技术能绝对抗干扰,抗干扰的研究必须以数据链系统间高效互连为前提。

信息一体化平台作为1个关键节点,可实现各种情报存储转发以及综合处理,是受敌攻击的重要目标。必须考虑在此节点受干扰或毁坏后,如何实现数据链网络快速修复重组。

综合考虑主要采取2种方案。1种方案是建立备份的信息一体化平台节点,一旦受干扰或毁坏迅速开启,链路中断的各终端按照事先制定的策略快速搜索此节点,通过完成安全认证,重新组建数据链互连网络。另外1种方案就是在统一各种局域数据链情报终端传输格式的基础上,直接在各情报终端间进行数据传输。无人机系统情报终端情报处理功能相对较完善,必要时,可优先考虑作为数据链的中心节点。

信息一体化数据链系统主要采取无线链接方式,在传输中,可能会受到复杂电磁环境的干扰而导致误差增大,影响

目标的定位和信息判断。尤其是在利用卫星中继传输过程中,容易受到敌方电子干扰,接受信号载噪比降低,造成数据误码率增加,情报数据出现严重错误,甚至直接导致链路中断。通常需要建立备用卫星链路,可以分别利用不同卫星在不同频段建立多条链路,在1条通信链路受干扰情况下,仍能够实现正常通信。

3 结束语

通过对无人机情报终端的改进设计,将无人机局域数据链融入到信息一体化平台中,增强了无人机情报传输时效及与诸武器系统之间的情报资源共享水平,进一步提高了侦察作战效能,为实现联合作战中的动态指挥提供了技术支撑。针对无人机数据链路中的信息网络体系结构的构建以及相关节点功能、接口等具体设计将在下步工作中进行研究。

参考文献:

- [1] 王铭三. 通信对抗原理[M]. 北京: 解放军出版社, 1998.
- [2] 王承恕. 通信网基础[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.
- [3] 孙义明. 信息化战争中的战术数据链[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- [4] 兰汉平, 丁锋. 战术数据链技术现状及发展研究[J]. 舰船电子工程, 2004, 24(5): 37-39.
- [5] 王克海, 王兵. 一体化联合作战研究[M]. 北京: 军事科学出版社, 2005.
- [6] 李冰, 陈自力, 邱金刚. 无人机通信信道模型研究[J]. 装备环境工程, 2009(1): 25-29.

(责任编辑 鲁进)

(上接第95页)

- [29] 朱家元, 郭基联, 张恒喜, 等. 多元分类LS-SVM设计与装备保障性评估[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 14(3): 12-15.
- [30] Vapnik V. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. Springer-Verlag, New-York, 1995.
- [31] Vapnik V. Statistical Learning Theory[M]. John Wiley, New York, 1998.
- [32] 李云松, 任艳君. 智能诊断技术发展综述[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(4): 122-125.
- [33] 李瑞莹, 康锐. 基于ARMA模型的故障率预测方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1588-1591.
- [34] 王广斌, 刘义伦, 李松柏, 等. 压缩机时间序列故障诊断在力控组态软件中的实现[J]. 风机技术, 2007, 6: 69-72.
- [35] 曾思勇, 杨文君. 回归分析法在用电量预测中的应用[J]. 内蒙古电力技术, 1999, 17(6): 46-47.
- [36] 王技, 钟海辉. 回归预测法在桥梁剩余寿命预测中的应用研究[J]. 公路交通技术, 2006, 1: 60-62.

(责任编辑 杨继森)