

# 复杂装备的故障预测技术

曹立军

杜秀菊

秦俊奇

黄景德

**摘 要** 针对复杂装备维修保障任务中面临的诸多困难,指出了传统的基于定期维修和事后维修的保障体系存在的局限性。着重介绍了复杂装备的故障预测技术,并结合多 Agent 理论,给出了基于多 Agent 的并行预测推理框架。

**主题词** 装备 故障预测 推理

## 引 言

随着现代工业和科学技术的飞速发展及现代战争对武器系统作战性能的更高要求,武器装备的结构日趋复杂,功能渐臻完善,自动化程度不断提高。与此同时,这也使装备的维修保障面临巨大的挑战:

### 1) 系统的不确定性

执行训练和作战任务的复杂武器系统、系统模型(包括保障对象模型和环境干扰模型)通常存在严重的不确定性。这里所说的不确定性具有两层含义:一是模型未知或知之甚少;二是模型的结构参数可能在很大的范围内变化,由此使得信息表达与处理不完备。另外,故障知识的表示

形式复杂多样,知识内容往往是零散的,不能统一加以研究,只能各部件分别由不同的领域专家来研究,其研究的方法和知识表示的手段都不可能一致;同时,知识的存在形式也是不确定的,在使用过程中,知识的内容必须随时动态修改,故不能构成完备的定义域。问题的求解也同样很困难,由于知识表示上的不完备,故不可能得到数学意义上的最优解,只能根据环境的变化与有限的知识给出相对时间和相对状态条件下的可能解。因此,传统的预测和诊断技术很难给出可靠的结论。

### 2) 任务的复杂性

早期的装备保障任务是将观测测量稳定在一个阈值范围内,一旦超出阈值则进行维修,因此装备保障任务的要求比较单一。对于现代复杂武器系统而言,保障任务的要求是异常复杂的。现代高技术条件下的局部战争要求装备具备在短时间内更强的快速打击能力,因而武器装备必须保证一定的无故障任务完成时间。因此,故障的事后诊断维修已不能

满足作战任务的需要,必须在战斗任务之前及时预测装备在未来任务中可能出现的故障,视情进行预知维修。这种故障预测是比故障诊断更高级、更复杂的保障行为。

### 3) 故障危害的严重性

现代战争要求装备在短时间内完成高强度的战斗任务。以自行火炮防御为例,战斗时间长,弹药消耗量大,火炮急袭射击和拦阻射击的频数较多,对火炮执行任务的成功概率要求较高。战斗任务期间一旦发生故障,将严重影响战斗任务的完成,乃至整个战役的进程,带来巨大的危害。

部队的技术检查手段往往只能检测出装备直观、外在的技术性能状况,而无法获得其大量内在的、深层次的性能状态信息。这就导致无法对其进行有针对性的保养和维护,尤其是任务执行前,因无法准确掌握所属装备的真实性能状况,难以判定在执行任务中是否能无故障工作,各级作战和保障部门很难制订科学合理的装备使用和维修计划,在使

本文 2003-11-05 收到,作者曹立军、秦俊奇、黄景德分别系军械工程学院博士研究生、教授、博士后;杜秀菊系河北师范大学博士研究生

用中往往出现各种各样的故障,影响了新装备战斗力的发挥。

## 1 传统维修保障技术的局限性

部队武器装备的完好率主要是以故障数作为统计依据,也就是通过定期或非定期地统计武器装备的故障数,再根据一些历史信息,对其进行评定等级并建立履历档案。从某种意义上说,这种保障模式只能反映武器装备的当前和过去的质量信息,却无法对其未来的质量状况进行准确的预测,所以这种传统的保障模式只能体现武器装备的战备完好性。对于军事指挥部门和总部机关,除需掌握武器装备的战备完好性信息之外,更关心其投入战斗以后所具备的作战效能,也就是任务的成功信息即战斗出动强度、机动性、持续作战能力和剩余寿命等,而任务的成功性主要是通过武器装备系统的动态特性来反映。但是,目前部队武器装备的维修保障,在技术管理手段上还无法实现对武器装备的质量、效能进行量化指标的评价,因此也就无法准确评估和掌握武器装备所具有的实际战斗力水平,即战备完好性和任务成功性指标,所以在当前武器装备技术保障的管理体制中只是要求战备完好性指标而没有任务成功性的具体指标要求。

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,这些工作主要都是围绕着故障诊断和如何修复故障进行的,诊断设备和器材也只是针对某一武器装备判断有无故障或出

现故障后诊断是何部位、何零件以及何原因引起的故障。然而,这只能保证装备在任务开始走得动、打得响,至于走多远、打多久却无可奉告。对于当前没有出现故障的武器装备,通过这些诊断仪器设备可以检测目前的故障发生情况,却不能准确预测在未来时间段内何时出现故障、出现什么故障,更不能对武器装备的总体质量和作战效能实现评估和预测,这已远远不能满足高技术条件下现代战争对维修保障能力的要求。

现代战争对新型复杂武器装备运行的安全性和可靠性提出了更高的要求,已不能满足于定期维修和事后维修。为此,在执行任务之前要及时预测装备在未来任务段内的无故障工作时间,保证装备的战备完好性和任务成功性,就必须建立科学合理的故障预测模型,准确预测可能出现的故障,变定期预防维修和事后诊断维修为视情预知维修。可见,故障预测是比故障诊断更为高级的维修保障形式,对于武器装备的维修保障而言,具有更高的实用价值。

## 2 故障预测技术

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。它以当前武器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,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。

发展故障预测技术,除了可减少或避免装备在使用过程中发生重大恶性事故外,对于改革现行的装备管理和维修制度也具有重要作用。目前采用的装备定期检测维修和事后维修,既可能造成不足维修(规定的检修期未到,装备已出现故障),也可能因过剩维修(规定的检修期已到,装备并未损坏,但不得不按制度进行例行检修)造成人力和物力的浪费。运用故障预测技术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。特别在执行训练和作战任务之前,对装备在未来任务段内的故障发生情况进行预测,及时维修更换零部件,保证充裕的无故障工作时间,对于完成训练和作战任务,提高部队的战斗力都具有十分重要的意义。

## 3 预测技术发展概况

预测问题是根据系统输出以及对应的输入可测部分的现在和过去观测值来估计将来的输出值。由于预测问题在社会或工程系统及军事领域中有着大量的应用背景,从而引起人们的广泛兴趣。但这也是一个比较困难的问题,特别对于多因素、非平稳和非线性的动态过程更是如此。对预测问题的研究可以追溯到远古

时代人们对天象、气候、收成和社会变化的猜测和预言。但真正科学意义上的预测或称为基于数学模型的预测始于 1927 年, Yule 和 Slutsky 分别提出了自回归 (AR) 模型和滑动平均 (MA) 模型; 1933 年 Kolmogorov 提高了基于概率的随机过程和估计理论, 他们的工作为预测研究奠定了理论基础。进入 20 世纪 80 年代, 人工智能、模糊逻辑、神经网络和灰色思想的引入, 为预测理论的发展注入了新的活力, 并成为当前自动化领域具有挑战意义的研究热点之一。

#### 1) 基于概率和数理统计的方法

随着概率和数理统计方法的不断成熟和大量统计数据的获得, 基于批次设备历史统计数据的概率和数理统计方法最早应用于故障预测, 它们包括时间序列预测法、主观概率预测法、回归预测法及 Box-Jenkins 模型。

这些传统的基于批次设备的大量历史数据运用数理统计方法, 只考虑几种单一因素进行统计综合出来的结果, 由于这种技术手段本身就存在许多不足: a) 数据变化规律只能假设符合单一分布规律, 而实际的武器装备在整个寿命周期内的变化规律不是单一而是多种分布的组合; b) 影响因素多, 而且也有数据来源及准确性的问题, 对于多种因素或多种条件同时变化的情况无法预测; c) 认为历史将延续到未来, 即一种事物过去随时间变化的趋势, 也是它以后随时间变化的趋势。又由于数理统计方法本身就不是给出严谨的数学解, 其

解的本身就有置信度, 也就是可信度水平, 它是样本的总体统计平均, 若将其用到单一的个体上误差是不可想象的。所以它也只能根据常规条件近似地预测整批武器的平均质量水平, 而无法做到对具体武器装备进行准确预测, 更不能对出现一些非连续情况以后 (偶然因素) 的武器装备进行评估和预测, 尤其对于多种因素或多种条件同时变化的情况将更加无法预测。

#### 2) 基于解析模型和知识的方法

在预测及故障诊断过程中, 完成推理求解的方法有多种, 主要分为两类: 一是强方法, 二是弱方法。

强方法就是传统的建模处理, 建立精确的数学模型, 模型用算法来描述, 将算法映射成计算机语言, 计算机按指定路径运行就可以得到结果。强方法主要用于精确模型的科学计算。对于复杂的武器系统, 很难用解析方法建立精确的整体模型。但随着仿真技术的不断发展, 一些大型的仿真软件得到广泛应用, 例如 ADAMS 可以对各种武器系统机械动力部分建立复杂的动力学仿真模型——虚拟样机, 服役过程中各部件在动态载荷下再现其磨损、老化和失效等故障产生过程。另外, 对于局部较小的子系统或单一部件, 如果系统需要, 也可以建立较为精确的解析模型。

弱方法就是刚刚兴起的知识处理, 不需要精确的模型和描述的算法, 因而问题可以是不精确的、不完整或模糊的, 使用的知

识本身就是经验的, 不严格的。求解问题需要经过反复的试探或搜索, 求解的过程就是搜索的过程。搜索包括对知识块的匹配、选择和解释, 匹配和解释的结果往往引起再搜索。如此反复、直达目的, 做出决策。

简单地讲, 强方法是定量推理, 弱方法是定性推理。强方法求解精确, 但建模困难; 弱方法可以作为强方法的有力补充。复杂装备由一系列功能各异的单一子系统组成, 各部分之间互相关联, 紧密耦合, 要进行准确的预测, 强方法和弱方法二者缺一不可。

Agent 是人工智能理论、面向对象技术及计算机科学相互融合的产物, 最早是人工智能理论的一个概念, 现在发展成为一种流行的产品设计与系统集成的工程方法论。Agent 技术为故障预测提供了一种新的计算和问题求解规范, 将强方法和弱方法归于统一的并行推理框架中, 这主要是因为基于多 Agent 的系统提供了一种分布并行处理的方法, 放松了对集中式规划和顺序控制的限制, 提供了分解控制、冲突控制和并行控制, 而且基于多 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, 是人工智能的最新发展方向。

#### 4 基于多 Agent 的并行预测推理框架

由多个实现不同功能的 Agent 组合起来协调工作就组成多 Agent 系统, 与单 Agent 相比, 多 Agent 系统通过协调可以完成更

复杂的任务。全部 Agent 构成一个团体联邦。在团体联邦中,按照任务分解范围,分为若干个子联邦,在子联邦内,Agent 有三种类型:管理 Agent、功能 Agent 和应用 Agent。三种类型的 Agent 分别处于不同层次,形成一棵 Agent 树形联邦,类型及层次关系限定了树上各 Agent 的地位和功能。

基于单个 Agent 进行推理判断存在着较大的缺陷,因为任何单一 Agent 的独立求解能力是有限的,不可能同时考虑问题的所有因素,并且存在着知识库的不完备性,影响求解结果的可靠性。在多 Agent 预测模型中,为综合不同推理机制的优势,系统中的各个 Agent 设计为异构的。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。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。由于各预测 Agent 之间存在着自主性及对对象知识描述的不完备性,不同的诊断 Agent 间的知识存在着差异,推理时所使用

的规则、事实、启发式搜索知识等存在不一致性,导致系统中各预测 Agent 的求解结果存在着差异。求解的最后结果在决策 Agent 中生成。一个底层项目组的并行诊断结构如图 1 所示。无论是系统级、子系统级或部件级的预测任务都至少是由这三类基本的 Agent 来协同完成。

各预测 Agent 之间是一种宏观层次上的高内聚松耦合结构,高内聚是指每个预测 Agent 具有关于其领域问题求解的比较充分的知识,基本上无须求助于另外的预测 Agent,松耦合是指各预测 Agent 的状态对于其它预测 Agent 的影响,表现为各 Agent 在功能上非确定性的具有模糊的关联和约束关系。在多 Agent 并行预测系统中,这种约束和关联是多个并行预测 Agent 之间实现冲突消解的必不可少的因素。这种多 Agent 预测结构不但使分布式推理和分布式的信息交换成为可能,而且具有良好的开放性,当系统复杂化时,只需增加相应的预测 Agent 即可。

实现故障准确预测的前提是

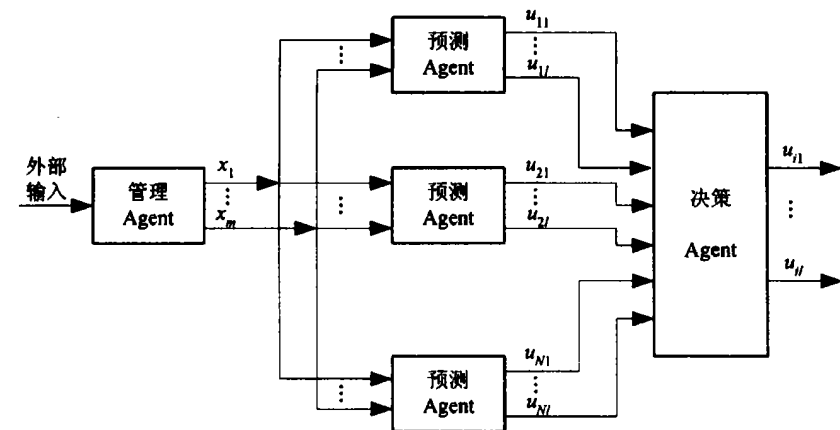


图 1 多 Agent 并行推理结构示意图

要有有效的方法来描述被保障对象的特性、相应的对策以及系统所处的环境、系统对象与对策之间的相互关系及影响,即与系统行为相关的各类知识的表示。传统意义上的建模和算法与现在意义上的知识表示具有同样的含义,具有多学科特性的基于多 Agent 的预测模型需要处理的知识从类型、复杂程度到知识的不同层次都大大超过了经典人工智能和传统控制理论的范围,它不仅需要处理描述系统特性的实时动态知识,还需要处理启发式知识、符号知识、反映系统结构和参数不确定性的知识和反映人类行为及思维中不精确性的知识。有效地表达系统中所涉及的各种知识已成为我们必然解决的中心问题之一。预测推理过程中各预测 Agent 通过协同合理地利用资源,对任务进行及时有效的处理,Halfawy 定义了一种三层结构框架进行 Agent 协同;Kaplan 围绕系统结构、需要完成的任务及资源提出了多 Agent 协同的 STAR 系统理论,解决了 Agent 协同过程中任务与资源分析的问题。

## 5 小结

传统的基于检查维修和故障诊断的维修保障体系已远远不能满足现代战争对复杂装备维修保障的要求。故障预测技术给复杂装备提供了更新、更有效的维修保障方法,也给维修保障制度带来了很大的改革。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。Agent 理论与装备维修保障技术研究相结合,既是理论对应用的推动,也是应用对理论的需求。二者的有机结合研究,不仅拓宽了 Agent 理论的应用范围,而且促进了装备维修保障技术的发展。

### 参考文献

- 1 张安华. 机电设备状态监测与故障诊断技术. 西安: 西北工业大学出版社, 1995
- 2 吴今培, 肖健华. 智能故障诊断与专家系统. 北京: 科学出版社, 1997
- 3 M. Wooldridge, N. R. Jennings. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115152
- 4 刘海燕, 王献昌, 王兵山. 多 Agent 系统的研究[J]. 计算机科学, 1995, 22(2): 5762
- 5 N. R. Jennings. Controlling Cooperation Problem Solving in Industrial Multi-Agent System Using Joint Intentions. Artificial Intelligence. 1995, 75: 131141
- 6 J. T. Malin, J. Kowing, et al. Multi-agent Diagnosis and Control of an Air Revitalization System for Life Support in Space. IEEE Aerospace Conference Proceedings. Big Sky, MT, 2000. Vol. 6: 300326
- 7 T. P. Fries. An Agent-based Approach for Fault Diagnosis in Manufacturing Systems. PhD. University of Louisville. 1998: 1100
- 8 M. M. Halfawy. A Multi-agent Collaborative Framework for Concurrent Design of Constructed Facilities. Ph. D thesis. The Ohio State University. 1998: 1315
- 9 D. J. Kaplan. The STAR system: An Unified Multi-agent Simulation Model of Structure, Task, Agent, and Resource. Ph. D thesis. Carnegie-Mellon University. 1999: 150196

## 白颊鳧无人机将进行展示性能的飞行试验

奥罗拉飞行科学公司计划于 2004 年 1 月对其研制的 7kg 的白颊鳧(GlodenEye)无人机进行飞行试验,旨在展示无人机从垂直飞行转为水平飞行的能力。这种能力已经在白颊鳧-50 无人机的首次飞行试验中得到了验证。这种垂直起降无人机的专门是为承载监视和化学毒剂探测传感器而设计的。其关键分系统是雅典娜技术公司的“制导星”飞行控制系统。目前,奥罗拉公司计划对该平

台只进行有限的降低风险的研究,随着其它几型小型廉价无人机的设计完成,将进一步对其进行试验。

奥罗拉公司研制的白颊鳧系列无人机具有噪音和热特征信号低的特点,其推进系统被罩在一个中心体内,发动机散出的热量与函道风扇吹出的冷空气混合。该系列无人机几乎可自主飞行,公司希望这样操作人员就可无须训练有素。当无人机沿某一航迹飞行时,可

在任意点加载新的航迹。

白颊鳧-50 无人机的用户群包括商业用户和本国政府。它的姊妹型——65kg 的白颊鳧-100 基本满足美国陆军对短距垂直起降无人机的要求。奥罗拉公司计划于 2005 年把白颊鳧系列无人机推向市场,预计美国陆军和海岸警卫队不久将披露其采购该无人机的合同条款。

李文杰