

# 预测与健康不确定性产生与传播机理研究

胡雷刚<sup>1</sup>, 肖明清<sup>2</sup>, 轩永波<sup>3</sup>, 黎凤起<sup>4</sup>

(1. 陆军航空兵学院 无人机中心, 北京 101123; 2. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038;

3. 空军研究院, 北京 100085; 4. 陆军航空兵学院 保障部, 北京 101123)

**摘要:** 针对预测与健康不确定性来源与传递问题, 开展了不确定性产生与传播机理研究; 首先, 提出了一种预测与健康管理开放式体系结构, 并提炼得到6项基本元素; 其次, 从基本元素入手, 从测量、数据、模型、方法、决策和使用共6方面分析了不确定性产生机理; 然后, 根据预测与健康管理工作流程, 分析了不确定性传播机理, 提出了不确定性传播定理; 最后, 在不确定性产生与传播机理分析基础上, 提出了预测与健康不确定性消解策略, 以期消减预测与健康管理过程中的不确定性。

**关键词:** 不确定性; 产生机理; 传播机理; 预测与健康; 不确定性消解

## Research on the Generating and Propagating Mechanism of Uncertainty for Prognostics and Health Management

Hu Leigang<sup>1</sup>, Xiao Mingqing<sup>2</sup>, Xuan Yongbo<sup>3</sup>, Li Fengqi<sup>4</sup>

(1. UAV Center of Army Aviation College, Beijing 101123, China;

2. Aeronautics Engineering School of Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

3. Air Force Research Institute, Beijing 100085, China;

4. Support Department of Army Aviation College, Beijing 101123, China)

**Abstract:** Dealing with the generating and transferring problem of uncertainty in Prognostics and Health Management, propagating mechanism of uncertainty was studied in this paper. Firstly, open system architecture was proposed, and its elements were extracted. Secondly, generating mechanisms were explored for measurement, data, model, method, decision and usage elements. Then propagating mechanism of uncertainty was investigated following the working flow of prognostics and health management. And propagation rules were proved. At last, also the most important, digesting policies were put forward for uncertainty according to generation and propagation mechanisms.

**Keywords:** uncertainty; generating mechanism; propagating mechanism; prognostics and health management; uncertainty perturbation

## 0 引言

作为实现经济可承受性、视情维修和自主保障的关键使能技术, 预测与健康成为新一代武器装备设计和使用中的重要组成部分。经过长期的技术积累以及在明确的发展需求推动下, 预测与健康已经在新一代武器装备中有了初步应用, 在民用领域得到了推广, 取得了显著成效; 但国内预测与健康研究仍处于起步阶段, 距装备中实用的预测与健康管理系统还有很长的路要走。

虽然国外预测与健康已经得到应用, 因涉及到新型武器装备, 只能通过有限的文献资料了解其皮毛, 国内预测与健康研发实践中诸多问题都无从借鉴。在文献综述基础上, 国内研究学者已经对预测与健康管理系统体系结构有了基本认识, 着力开展预测与健康关键技术

研究, 并且近两年来出现了预测与健康验证与评价<sup>[1-2]</sup>以及不确定性管理<sup>[3-4]</sup>的需求。

确定性是指客观事物联系和发展过程中有规律的、必然的、清晰的、精确的属性。不确定性是指客观事物联系和发展的过程中无序的、偶然的、模糊的和近似的属性。麦克斯韦、波尔兹曼、海森堡等研究表明: 不确定性在客观世界是真实存在的, 与人类是否无知没有关系<sup>[5]</sup>。信息是确定或不确定本身并无所谓好坏, 问题在于我们怎么正确认识确定性与不确定性, 以及如何把握不确定性的本质规律。

不确定性通过各种因素进入预测与健康过程, 不断累积并向下一阶段传递, 且不确定性不会自然消减。由于预测的固有属性、数据的不确定性、虚警干扰等因素, 预测与健康具有很强的不确定性, 不确定性问题的处理成为预测与健康系统正常工作、发挥保障能力的重要环节。本文主要从工程方面分析不确定性的产生机理和传递问题。

## 1 预测与健康管理体系结构

### 1.1 现有预测与健康管理系统结构

对波音公司的健康管理系统、利文斯敦基于模型的健

收稿日期: 2019-08-31; 修回日期: 2019-09-15。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703427); 部委级“十三五”预研资助项目。

作者简介: 胡雷刚(1985-), 男, 河北邯郸人, 工学博士, 工程师, 主要从事无人机测控与信息传输、预测与健康方向的研究。

康管理系统和联合攻击战斗机的预测与健康管理系统等典型预测与健康管理系统结构进行分析。

波音公司提出的基于逻辑分层的健康管理体系结构如图 1 所示, 该系统采用分层的体系结构, 应用于无人作战飞行器和波音 777。系统特点分为信号处理层、状态监测层、健康评估层、预测层、决策支持层及表示层 6 个功能层, 具备控制功能, 能够主动指挥诊断、预测以及健康评估过程, 具备资源管理功能, 能够根据给定工况、历史数据和可用通信资源提供高质量的系统健康信息。

利文斯敦 (Livingstone) 预测与健康管理系统是一种基于模型的健康管理系统, 应用于 X-34、X-37 等可重复发射运载器上, 该系统最主要特征是利用定性模型和传统人工智能推理技术, 综合各个部件、子系统的健康信息, 实现系统级的健康管理及重构控制。

联合攻击战斗机的预测与健康管理系统是一种基于区域管理器的体系结构, 如图 1 所示, 以区域管理器为核心分为三层。

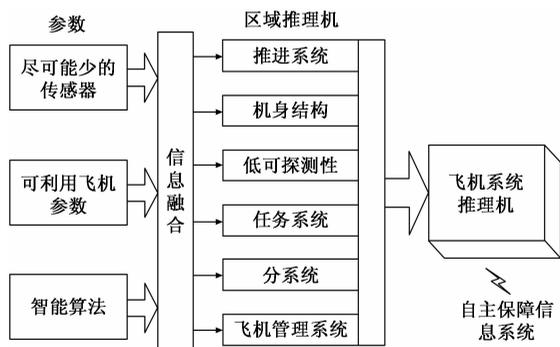


图 1 机载预测与健康管理系统结构

第一层是传感器层, 用于完成原始数据收集; 第二层由多个区域管理器构成, 负责处理来自传感器层的数据; 最高层是飞机推理机, 用于综合飞机各个子系统信息, 得到飞机整体的健康评估信息。该系统结构具有以下特点: 1) 专用传感器用量极少; 2) 针对不同的功能子系统, 设计专门的区域管理器; 3) 高层数据融合统一在飞机管理器中进行, 消除单个传感器故障引发虚警的现象; 4) 决策支持工具在自主保障信息系统中实现, 机上预测与健康管理系统为决策支持系统提供必要的辅助决策的数据和信息。

### 1.2 预测与健康管理系统开放式体系结构

在提炼现有预测与健康管理系统结构特征的基础上, 借鉴视情维修的开放式体系结构, 提出了预测与健康管理系统开放式体系结构, 如图 2 所示。

预测与健康管理系统开放式体系结构由 7 部分组成: 1) 数据采集: 利用各种传感器采集系统参数信息, 是预测与健

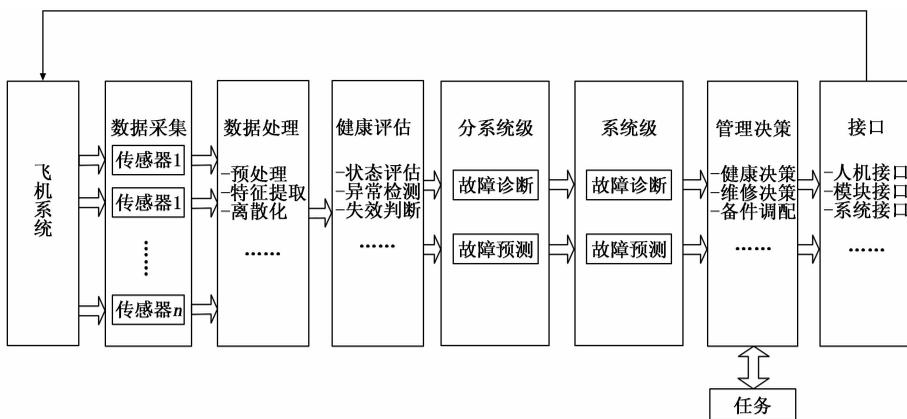


图 2 预测与健康管理系统开放式体系结构

康管理系统的数据库; 2) 数据处理: 接收来自传感器及其它数据模块的信号、数据, 对数据进行基本的预处理、特征提取、离散化等, 并将处理后数据传输给后续模块, 因此本部分也包含数据传输功能; 3) 健康评估: 接收数据, 并用于异常检测、失效判断、评估分系统的健康状态<sup>[6]</sup>; 4) 分系统级故障诊断与预测: 主要包括分系统的诊断推理、故障隔离和分系统的健康状态、剩余寿命的预测; 5) 系统级故障诊断与预测: 在分系统级诊断与预测基础上, 进行系统级的诊断推理、故障隔离, 以有效滤除虚警, 提高诊断有效性; 进行系统级的健康状态、剩余寿命的预测; 6) 健康管理决策: 根据系统级故障诊断与预测结果, 结合装备任务进行维修决策、配件调配决策等; 7) 接口: 主要包括人一机接口、模块间接口、与其他系统接口等。人一机接口包括健康评估、故障诊断与预测的数据信息的表示等; 模块接口指系统内不同模块之间的数据信息交换接口; 与其他系统接口指预测与健康管理系统与其他系统间的数据信息传递接口。预测与健康管理系统开放式体系结构是逻辑上的结构划分, 在实际的物理系统中, 其不同模块之间并没有明显的界限。

### 1.3 预测与健康管理系统基本元素

根据预测与健康管理系统开放式体系结构可得预测与健康管理系统的基本元素有传感器、状态、数据、模型、诊断方法、预测方法、接口、决策。

1) 传感器。传感器是预测与健康管理系统的数据源, 完成飞机系统状态的获取、数据的采集, 传感器元素不仅包含物理意义上的传感器, 也包含有高级算法组成的虚拟传感器以及可完成数据采集的机内测试、监控装置等; 2) 状态。状态是飞机系统及其设备、分系统工作与健康状况的客观存在, 不因数据或信息的不完整、不准确而改变。正因为状态是一种客观存在, 可以通过监测、测试来认识设备的工作与健康状况; 3) 数据。预测与健康管理系统通过数据来识别飞机系统的状态, 对于复杂系统的飞机而言, 表征状态的数据是庞大的, 例如在一次飞行任务中联合攻击战斗机的预测与健康管理系统可存储 10 亿字节的数据信息; 4) 模型。模型是预测与健康管理系统对设备、系统状

态进行评估的依据, 是进行故障诊断、寿命预测的基础。随着人工智能在诊断、预测中的应用, 模型更加宽泛; 5) 诊断方法。用于对设备与系统故障进行隔离、定位的方法, 诊断方法应能消除虚警, 实现精确、可靠的故障隔离、定位; 6) 预测方法。用于对设备与系统进行故障预测、剩余寿命预测的方法, 故障预测是预测与健康管理系统的重要特征之一, 预测方法应能提供可用于设备健康管理决策的故障预测与剩余寿命预测结果; 7) 接口。接口主要完成预测与健康管理系统与操作人员、维护人员的交互, 以及预测与健康管理系统内部各模块之间、预测与健康管理系统与其他系统之间的信息传递; 8) 决策。决策是指根据判定的系统状态, 结合任务做出维修决策、备件调配决策。

其中传感器、接口为有客观实体的物理元素, 数据、模型、诊断方法、预测方法为信息元素, 状态、决策为管理元素。

## 2 预测与健康管理系统不确定性产生机理

由预测与健康管理系统的基本元素入手, 从测量不确定性、数据不确定性、模型不确定性、方法不确定性、决策不确定性和使用不确定性 6 个方面分析其不确定性产生机理。

### 2.1 测量不确定性机理分析

测量是预测与健康管理系统数据的主要获得途径, 因而测量也是预测与健康管理系统不确定性的基本来源<sup>[7]</sup>。测量不确定性源于传感器误差、方法误差、设计缺陷和环境影响。

传感器误差是指传感器、监控设备本身电气或力学等性能不完善造成误差。如传感器或监控设备出厂校准度不准确产生的校准误差; 分辨力有限造成的量化误差, 监控设备内部噪声引起的内部噪声误差; 传感器疲劳、老化及工作环境变化造成的稳定误差<sup>[8]</sup>, 监控设备响应的滞后现象造成的动态误差等。

方法误差是指所使用方法不当, 或测量所依据的理论不严密, 或对测量计算公式不适当简化等原因造成的误差。例如用均值检波器测量交流电压时, 输出电压平均值  $\bar{U}$  与有效值  $U$  如下关系:

$$U = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}\bar{U} \quad (1)$$

取近似公式  $U \approx 1.11\bar{U}$  时, 就产生了误差, 这种由于公式的简化或近似造成的误差就是方法误差。

设计缺陷是指系统设计时对传感器、监控设备设计不当造成的误差。如系统设计时对传感器布局不合理对参数造成的测量误差, 监控设备采集数据时机不恰当造成的数据误差。

环境影响是指实际工作环境与理想情况不一致对传感器、监控设备测量造成的误差。对电子测量而言, 主要的影响因素有环境温度、电源电压和电磁干扰等。

### 2.2 数据不确定性机理分析

数据是武器装备状态与健康信息的主要载体, 也成为预测与健康管理系统不确定性的主要表现形式。数据不确定性一部分根源于测量不确定性, 另一部分来源于数据传输、

处理、运算、存储过程中的噪声与干扰<sup>[9-10]</sup>。

预测与健康管理系统的数据主要通过传感器与监控设备测量获得, 因此数据的一部分不确定性是伴随着测量过程而与生俱来的。由测量不确定度概念知, 测量结果并不是一个绝对的数值, 而是具有一定分散性的测量值。

武器系统中数据主要通过总线进行传输, 数据在传输、存储过程中受软件缺陷、噪声干扰会导致数据污染, 增加数据的不确定性。有效数字的取舍是测量结果基本的处理操作, 通常的四舍五入会降低测量结果的精度, 而不同级别的级联四舍五入则增强了其不确定性。不同精度的测量结果运算会放大数据的不确定性。

数据不确定性表现为数据的随机性、模糊性、不完备性和不协调性。数据的随机性是指数据由于多次测量误差或多次冲突的测量引起的数据不可靠, 且有些数据是随时间在发生变化的; 数据的模糊性是指数据用来表示某些边界不明确的概念引起的不确定; 数据的不完备是指数据的丢失、不完全或者无法确定, 表现为数据残缺; 数据的不协调是指两个或多个数据的条件属性相同, 但决策结果不相同或不一致, 表现为数据矛盾。

### 2.3 模型不确定性机理分析

模型不确定性的根源是装备或问题本身的不确定和人们认识的局限性。在预测与健康管理系统中, 模型不确定性主要源于对装备或问题认识的不足、对问题的简化、模型参数的不确定、模型求解过程的不确定。

人们对事物的认识是一个不断加深的过程, 对装备、问题认识的局限性或不足都会导致建立的模型不能理想地反映装备的状态或问题的实质, 从而产生不确定性。对于复杂问题, 通常根据实际工作环境做出条件假设以简化问题, 建立的模型带有因假设、简化产生的不确定性<sup>[11-13]</sup>。

模型的部分参数需要通过拟合、训练、仿真或经验取值得到, 在参数计算过程中得到的只是在当前样本条件下的局部最优值, 也即近似值, 带有很大的不确定性。复杂系统的模型通常转化为规划问题、最优化问题, 然后通过搜索、逼近或人工智能等方法求解, 而这种转化和求解存在简化、等效或局部最优, 因此模型的求解过程也具有较强的不确定性。

模型不确定性最终体现为求解结果, 即诊断结果、预测结果与决策结果的不确定性。

### 2.4 方法不确定性机理分析

诊断方法、预测方法是实现故障诊断与预测的主要技术途径, 方法不确定性主要源于对问题认识的局限性、方法本身的不足或缺陷、模型的不确定性、数据的不确定性。

复杂武器系统的故障诊断、故障预测涉及系统结构、物理模型、可测性设计、模式识别、诊断推理等多个相关学科领域; 装备的诊断与预测是建立在对装备的物理结构、工作过程与失效机理认知基础上的, 对装备(特别是失效机理)认知有限的条件下, 诊断与预测方法不可避免地具有不足与缺陷, 成为不确定性的来源。

故障诊断、预测方法以物理模型、诊断模型、预测模

型为依据, 模型不确定性会传递至诊断与预测方法, 给诊断与预测结果带来不确定性<sup>[14-15]</sup>。虽然人工智能在故障诊断、预测中的应用越来越多, 但大多数人工智能(如神经网络、支持向量机等)理论本身就存在不确定性, 且智能算法仍需与装备模型相结合, 获得针对实际装备的诊断、预测方法, 最终将不确定性传入预测与健康管理系统。

无论采用何种方法, 数据都是进行诊断、预测的基础, 数据不确定性也是方法不确定性的体现。

### 2.5 决策不确定性机理分析

预测与健康管理的目的在于给装备的使用、保障提供及时、准确的维修决策, 而维修决策恰是在故障诊断、剩余寿命预测基础上根据可用资源和使用需求做出的决策。决策不确定性主要源于诊断与预测结果的不确定性、决策方法的不确定性、未来使用的不确定性。

决策以诊断与预测结果为依据, 诊断与预测结果带有的不确定性会对决策产生影响, 尤其是预测的不确定性。剩余寿命预测是对装备未来状态的预计, 本身即带有很强的不确定性, 根据其预测结果进行维修决策必然给决策时机带来不确定性。

在数据不完备或不协调、诊断与预测结果不确定的条件下, 决策方法要具有处理不确定信息的能力, 以在不确定信息中获得最佳的决策, 但其决策不能消除不确定性<sup>[16-17]</sup>。

装备的剩余寿命预测结果与未来时间内的任务、使用及工作负荷密切相关, 但装备未来的使用具有很强的不确定性, 因此对维修决策带来不确定性扰动。

### 2.6 使用不确定性机理分析

故障预测是预测与健康管理的显著特征之一, 而剩余寿命受装备未来的工作方式、使用环境影响。使用不确定性主要源于任务的不确定性、未来的不确定性。

武器装备的任务具有一定的随机性, 任务的不确定性给装备的工作环境、工作方式带来了不确定性。虽然装备可满足不同环境下的使用条件, 但不同的环境、不同的工作状态对装备剩余寿命的影响是不尽相同的。

客观事物的变化发展具有客观规律性, 但世界并不是“机械决定论”描述的机械因果关系, 世界具有偶然性、随机性, 先进的预测算法可以在概率学上预测装备未来状态的发展趋势, 但武器装备的未来具有较强的随机性<sup>[18]</sup>。

## 3 预测与健康管理系统不确定性传播机理

### 3.1 不确定性传播机理

由不确定性产生机理分析知, 预测与健康管理的各个阶段都有不确定性产生因素, 而且在预测与健康管理工作过程中前一阶段的不确定性会传递到下一阶段, 导致不确定性的积累与传播<sup>[19]</sup>。

作为装备的组成部分, 预测与健康管理系统在系统设计阶段即有不确定性干扰。自系统设计始, 预测与健康管理系统工作过程如图 2 示。同样自系统设计始, 不确定性通过各种因素进入预测与健康管理工作过程, 并不断积累、传播, 最终累积至健康管理决策处, 体现为管理决策的不确定性, 如图 3 所示。

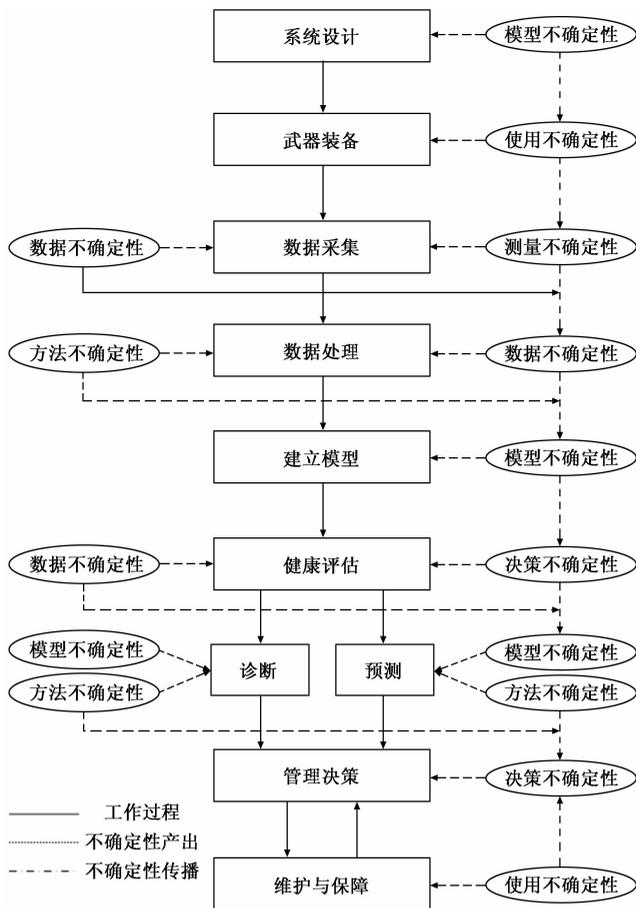


图 3 预测与健康管理系统不确定性传播过程

分析不确定性在不同阶段传播过程知：

1) 预测与健康管理系统是不确定性传播的物理载体。从系统设计开始的不确定性干扰到武器装备使用的不确定性以及数据采集过程中的测量不确定性, 都是在实际的物理设备层传播、积累; 数据处理、健康评估、故障诊断、故障预测、管理决策等不确定性主要在系统软件层传播、积累, 而系统软件也是以预测与健康管理系统为物理载体。

2) 数据是不确定性传播的媒介, 也是不确定性传播过程中的主要表现形式。不确定性在预测与健康管理系统过程中主要以数据为媒介进行传播, 如系统设计的模型不确定性、武器装备的使用不确定性在数据采集阶段都通过测量传递为数据的不确定性, 且在数据处理、健康评估、故障诊断、故障预测、管理决策等阶段不确定性都以数据的形式传递, 并依附于数据而不断积累。

3) 管理决策是不确定性传播与积累的最终体现。预测与健康管理系统进行数据采集、数据处理以及根据数据进行故障诊断、故障预测的目的是为了更全面、更真实地掌握武器装备的状态, 为最终进行健康管理提供依据, 所以不确定性传播、积累最终体现在健康管理决策中。

### 3.2 不确定性传播定理

信息论中, 通常用信息熵作为衡量信源不确定性的量度。预测与健康管理的本质是实时获取装备的健康信息,

并及时地做出维护保障决策。本文用信息熵原理研究预测与健康管理中不确定性传播规律。

测量是预测与健康管理的根本元素,也是获取装备信息的最根本途径,首先分析测量过程中信息熵的变化:对某信号  $X$  进行测量,测量结果为  $Y$ ,记  $H(X)$  为装备信号的信息,表征装备信号的不确定性<sup>[20]</sup>;记  $H(X|Y)$  表征获取信号的测量值后被测信号的不确定性,称  $H(X|Y)$  为测量损失熵。则有:

$$I(X,Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (1)$$

表征测量前后被测信号不确定性的变化,称  $I(X,Y)$  为测量信息熵。

定理 1: 测量信息熵为非负值,且小于被测量的信息量,即:

$$0 \leq I(X,Y) \leq H(X) \quad (2)$$

由信息熵的非负性,上式可证;且实际工作中,测量值与被测值之间存在误差, $H(X|Y) > 0$ ,则式(2)右侧的等号取不到,有:

$$0 \leq I(X,Y) < H(X) \quad (3)$$

测量的本质是获取信息,由定理 2.1 知,测量过程中由于不确定性干扰会造成武器装备的信息认知不完备。

在预测与健康管理工作过程中,数据采集后通常要对测量值进行处理,如对测量结果  $Y$  进行数据处理  $Z = f(Y)$ ,记  $H(X|Z)$  表征数据处理后被测信号的不确定性, $I(X,Z)$  为处理后数据信息熵。

定理 2: 数据处理后的信息量少于等于原始测量值的信息量,即:

$$I(X,Z) \leq I(X,Y) \quad (4)$$

证明: 由  $Z = f(Y)$  有确定的函数关系,而非概率关系,知:

$$P(Z|X,Y) = P(Z|Y)$$

式中,两边同乘以  $P(X|Y)$ ,得:

$$P(X,Z|Y) = P(X|Y)P(Z|Y)$$

即在  $Y$  已知的条件下, $X$  与  $Z$  相互独立: $I(X,Z|Y) = 0$ 。

则有:

$$I(X,Z) = I(X,Y) + H(X,Z|Y) - H(X,Y|Z)$$

即:

$$I(X,Z) = I(X,Y) - H(X,Y|Z) \quad (5)$$

由  $H(X,Y|Z)$  的非负性, $I(X,Z) \leq I(X,Y)$  得证。

根据定理 2 知,数据经过处理后会丢失信息,数据处理得恰当、细致些,会减少信息的损失,以增加复杂性、时间和存储空间为代价。认识到为了采用方法从数据中获取直观有效的信息,必要的数据处理也是适当的。

数据经过处理后,不确定性增强,将式(1)代入式(5),得:

$$I(X,Z) = H(X) - H(X|Y) - H(X,Y|Z) \quad (6)$$

可知数据采集阶段的测量不确定性传递到数据处理阶段,导致数据处理阶段不确定性的积累与叠加。在预测与

健康管理的后续阶段,不确定性的传播同样会导致信息的损失以及不确定性的积累,推导过程同式(1)~式(6),限于篇幅,本文不再赘述。可得不确定性传播推论:

推论 1: 在预测与健康管理信息流动方向上不确定性会不断放大、增强。

## 4 预测与健康不确定性消解策略

经过不确定性产生与传播机理分析知,预测与健康不确定性是在所难免的,但有些不确定性产生因素可以在设计、使用过程中减少,可以提高方法的处理能力以尽力减小不确定性传播过程中的扩散与积累。

### 4.1 减小测量与模型不确定性

模型不确定性的来源主要与主观因素有关,测量不确定性则可通过严谨的设计与修正减少,因此对于测量与模型不确定性主要通过改进测量方法和模型减少。

从预测与健康管理系统设计阶段入手,根据预测与健康需求建立真实、合理的系统模型,用于指导预测与健康管理系统的设计与研制,并在研制过程中根据试验结果的反馈进行修正,以期减小设计阶段的不确定性。例如依据健康监控需求建立多传感器布局模型,在装备研制过程中根据试验结果的反馈进行调整。

选取适应性更强的传感器,避免因传感器自身性能不完善带来的误差;完善监控设备、传感器的设计与使用方法,避免因设计缺陷或测量计算公式简化不合理带来误差;对于因环境带来的偏移或非线性测量偏差,采用校正方法进行修正以减小环境因素带来的不确定性。

加深对装备与问题的认识,建立更贴近装备实际、反映问题本质的物理模型、诊断模型与预测模型;减少不合理的简化,用更详细的模型描述问题;在模型应用过程中,不断地修正参数、改进模型以及模型求解方法,减少因模型参数与求解过程引起的不确定性。

### 4.2 跟踪与评估数据不确定性

数据是预测与健康不确定性传播媒介和主要表现形式,可以通过跟踪和评估数据的不确定性来监控不确定性的传播与积累。

对于由传感器与监控设备测量得到的数据采用测量不确定度替代测量误差来表示数据的不确定性。测量不确定度定义为表征合理地赋予被测量值的分散性<sup>[21]</sup>,与测量结果相关联的参数。测量不确定度克服了经典误差理论中由于误差定义及计算方法不完善带来的弊端<sup>[22]</sup>,更加科学、合理和使用。自 20 世纪 90 年代国际计量局和国际标准化组织等机构发行《测量不确定度表示指南(GUM)》以来,测量不确定度在国外研究测试计量实验室、认证机构中逐步推广。

在数据传输过程中采用数据校验方式增强数据的鲁棒性,避免因传输总线中的干扰噪声数据造成污染与缺失;数据处理中,减少四舍五入处理次数,避免因级联造成的不确定性增强;数据运算过程中,对运算模型进行不确定性传播分析<sup>[23-24]</sup>,跟踪、标定不确定性的增长与变化。

### 4.3 增强方法与决策处理能力

可以尽量地减少测量与模型的不确定性,更科学、合理地表示数据的不确定性,但数据中的不确定性不会消失,因此增强诊断、预测方法与决策过程的不确定性信息处理能力是解决不确定性问题的有效途径。

由分析知,数据不确定性表现为数据的随机性、模糊性、不完备和不协调,其中尤以数据的不完备、不协调突出。增强不确定数据条件下的故障诊断能力、减小故障预测结果中的不确定性是故障诊断、预测方法有待改进之处。同时,在不确定条件下进行合理的装备健康管理决策也是消解不确定性在决策层干扰的有效策略。

遵循增强方法与决策处理能力的策略,论文后续章节以具体的不确定性问题为切入点开展研究,增强故障诊断方法处理不协调与不完备信息能力、故障预测方法处理不确定性表示能力、不确定条件下的健康管理决策能力,达到消解预测与健康管理中不确定性的目标。

## 5 总结

在总结已有预测与健康管理系统结构特点的基础上,借鉴视情维修的开放式体系结构,提出了一种预测与健康管理系统开放式体系结构;并提炼其基本元素得到传感器、状态、数据、模型、诊断方法、预测方法、接口和决策8项元素;由基本元素入手,从测量、数据、模型、方法、决策和使用6方面分析了不确定性产生机理;然后,从基本元素入手,根据预测与健康管理工作流程,分析了不确定性传播机理,提出了不确定性传播定理;最后,在不确定性产生与传播机理分析基础上,提出了预测与健康不确定性消解策略,以期消减预测与健康过程中的不确定性。

借鉴BIT使用的教训与经验,对于预测与健康管理系统,不确定性的处理是其达到研制目标的关键环节,本文通过不确定性产生机理分析,加深了对预测与健康的不确定性的认知,也对进一步开展不确定性问题研究打下基础。

### 参考文献:

[1] 景博,杨洲,张劼,等.故障预测与健康管理系统验证与确认方法综述[J].计算机工程应用,2011,47(21):23-27.

[2] 吴明强,房红征,文博武,等.飞行器故障预测与健康(PHM)集成工程环境研究[J].计算机测量与控制,2011,19(1):98-101.

[3] Wang P F, Youn B D, Hu C. A generic probabilistic framework for structural health prognostics and uncertainty management [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28: 622-637.

[4] Pecht M, Jaai R. A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(2): 317-323.

[5] 李德毅,刘常显,杜鷗,等.不确定性人工智能[J].软件学报,2004,15(11):1583-1594.

[6] Chen C C, Brown D, Sconyers C, et al. A . NET framework for an integrated fault diagnosis and failure prognosis architec-

ture [A]. IEEE Auto Test Con. 2010 [C]. Orlando, 2010.

[7] Vichare N M. Prognostics and health management of electronics by utilizing environmental and usage loads [D]. Park: University of Maryland, 2006.

[8] Zhang G F. Optimum sensor localization/selection in a diagnostic/prognostic architecture [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005.

[9] 杨威.基于信任函数理论的不确定性信息融合技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008.

[10] Mrugalski M, Witczak M, Korbicz J Z. Confidence estimation of the multi-layer perceptron and its application in fault detection systems [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 21(9): 895-906.

[11] Chookah M, Nuhi M, Modarres M. A probabilistic physics-of-failure model for prognostic health management of structures subject to pitting and corrosion-fatigue [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96(8): 1601-1610.

[12] Dong M, Peng Y. Equipment PHM using non-stationary segmental hidden semi-Markov model [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27: 581-590.

[13] Briand D. Applying Bayesian updating methods to a new combined lifecycle failure distribution [D]. Albuquerque: University of New Mexico, 2007.

[14] Saha B, Goebel K, Christophersen J. Comparison of prognostic algorithms for estimating remaining useful life of batteries [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2009, 31(3): 293-308.

[15] Das S, Harrison G A, Bodkin M A, et al. Adaptive prognostic approaches combining regime identification with equipment operating history [A]. IEEE Auto Test Con. 2010 [C]. Orlando, 2010.

[16] Saha B. A model-based reasoning architecture for system-level fault diagnosis [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2008.

[17] 杨鹏.基于相关性模型的诊断策略优化设计技术[D].长沙:国防科学技术大学,2008.

[18] Varadarajan G. Data driven framework for prognostics [D]. Arizona: Arizona State University, 2010.

[19] Ayyub B M, Klir G J. Uncertainty modeling and analysis in engineering and the sciences [M]. New York: Chapman & Hall/CRC, 2006.

[20] 肖明珠,陈光祜.测量的熵分析[J].系统工程与电子技术,2004,26(3):373-374.

[21] 曾翔君,骆一萍,申森.测量不确定度导论[M].西安:西安交通大学出版社,2011.

[22] 祖先锋.军用自动测试系统及其不确定度评定关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2007.

[23] 罗丹会,许汉铭.分析不确定性传播离散矩法(DnMp法)[J].核科学与工程,1989,9(3):226-236.

[24] 方甲永,肖明清,盛晟,等. PHM系统中的测试不确定优化选择建模[J].计算机测量与控制,2018,26(8):55-59.