

# 预测和健康管理技术

## Technology of Prognostics and Health Management

西北工业大学自动化学院 宁东方 章卫国 李 斌



宁东方  
博士研究生。主要研究方向为飞行控制,故障诊断。

PHM的思想是利用各种先进的传感器采集系统的状态数据,并采用各种算法进行特征提取,获取系统的健康状态特征,以实现系统健康状态的监控、预测和管理。PHM的目的不是消除故障,而是了解和预测故障何时发生。

域的工程系统,包括飞控系统作动器的故障诊断和寿命预测<sup>[2-4]</sup>、飞行器推力系统<sup>[5]</sup>、供油系统<sup>[6]</sup>和供电系统的健康监测<sup>[7]</sup>、航空器的结构健康监测<sup>[8]</sup>、轴承的寿命预测<sup>[9-10]</sup>、航电系统<sup>[11]</sup>和汽车发动机的故障诊断和预测等<sup>[12-15]</sup>。

本课题从PHM的相关概念出发,介绍PHM的开放式结构和JSF预测和健康管理系统的组成以及应用情况,并对PHM推理技术进行了重点论述。

### 健康管理的定义

飞行器的健康状态描述了其构成系统、子系统以及部件执行所设计功能的能力。飞行器的健康管理(HM)定义为与其健康状态直接相关的管理活动,即了解飞行器及其组成部分的状态,在出现功能失灵时将其恢复到正常状态,而在系统故障后将安全风险和对任务的影响降到最小<sup>[1]</sup>。

PHM技术为检验和监控飞行

器的当前健康状态,同时根据系统以前、现在的运行情况,预测飞行器未来健康状态进程,改善飞行器的安全性和提高地面维护的效率,从而降低飞行器使用/维护成本、提高飞行器的出勤率和完备性<sup>[16]</sup>。PHM以诊断、预测为主要手段,体现和依托的是人工智能,具有智能和自主的典型特征,必须建立在状态感知、信息融合和辨识的基础上。

### PHM的内容和行为

PHM的思想是利用各种先进的传感器采集系统的状态数据,并采用各种算法进行特征提取,获取系统的健康状态特征,以实现系统健康状态的监控、预测和管理。

PHM的目的不是消除故障,而是了解和预测故障何时发生。PHM的主要内容为:

(1) 故障检测,即检测系统、子系统或组件是否存在工作不正常的地方;

(2) 故障诊断,故障诊断包括故

为了解决高的战术技术指标与可承受成本之间的矛盾,减少开发和维护费用,提高新一代战斗机的可支持性和可维护性,美国在联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter, JSF)计划中采用了先进的预测和健康管理技术(Prognostics and Health Management, PHM),为飞机上的每个主要系统和子系统提供故障检测和隔离能力,对特定的部件提供预测能力<sup>[1]</sup>,最终实现整个飞行器健康状态的监视和管理。随着PHM技术有用性的展现,其研究和应用已经涉及到航空、航天、汽车、电子等各个领

障隔离和故障辨识,故障隔离是确定系统发生故障的位置。故障辨识是确定故障发生的主要原因和故障的模式;

(3) 预测,即确定系统失效将发生的时间及系统、子系统或组件的剩余使用寿命,预测能力是PHM区别于其他诊断系统的一个最重要的特征。

PHM在确定系统的健康状态时,需要进行的主要行为包括:

(1) 通过收集、分析和测试原始传感器数据,检测故障征兆;

(2) 对故障的根本原因进行诊断;

(3) 确定故障对系统健康状态的影响;

(4) 预测系统健康状态的进程。

上述行为的2个主要实现条件是:

- 支持决策的传感器数据是否足够;

- 这些数据是否适合用来确定系统的健康状态。

### PHM系统的功能结构

对JSF而言,PHM系统的主要功能有:

(1) 可测试性/机内自测试能力;

(2) 传感器、组件和子系统级的相应数据获取能力;

(3) 增强的诊断能力,这种能力是通过系统模型、组件的相关性和信息融合等技术获得的;

(4) 预测能力,包括组件的材料状态评估和剩余有用寿命的预测;

(5) 健康管理能力,包括与机载人员和子系统管理人员一起,在存在系统异常的情况下,最大化系统的效用,给维修人员和最佳的维修计划提供决策支持。

PHM系统的这些功能主要是由机载和地面系统及其支持结构来实现的<sup>[17]</sup>。

### PHM的推理技术

#### 1 PHM系统的推理结构

PHM的预测推理结构为基于条件维修的开放系统结构<sup>[18]</sup>。这个结构主要由波音公司开发。

PHM的开放系统结构,主要由如下7层组成:

(1) 数据获取层。

数据获取层位于七层结构的最底层,该层与飞机上的特定物理测量设备相连接,其功能是收集来自数据总线上传感器的信号(例如电流传感器、加速度计、温度传感器和速度传感器等),为PHM系统进行下一步的工作提供数据支持。

(2) 数据处理层。

该层的主要功能是处理来自数据获取层的数据,通过一些特征提取算法把所获取的数据转换成状态监测、健康评估和预测层所需要的形式,这些信号特征能够以某一种形式表征系统/组件的健康。通常采用的数据处理算法包括快速傅立叶变换、神经网络、小波、卡尔曼滤波或统计方法(平均、标准偏差)等,数据处理层的输出结果包括经过滤、压缩后的传感器数据、频谱数据以及其他特征数据等。

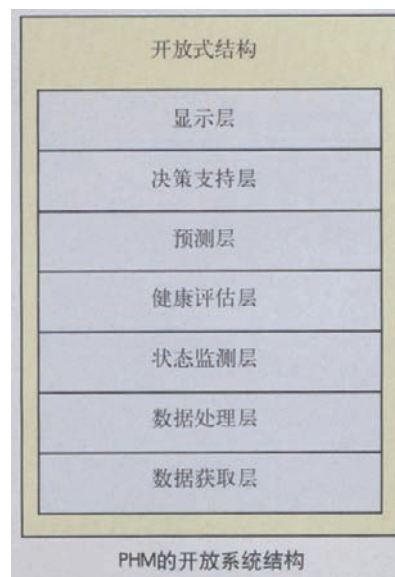
(3) 状态监测层。

状态监测层接收来自传感器、数据处理层以及其他状态监测模块的数据。其主要功能是完成与系统状态相关的特征的计算和估计,即将获取的数据同预定的失效判据等进行比较来监测系统当前的状态,并且可以根据预定的各种参数指标极限值/阈值来提供故障报警能力,例如对子系统、部件的行为以及材料的状况进行测试和报告,此外也对运行环境进行检测和报告。状态监测层又可称为状态监控层。

(4) 健康评估层。

健康评估层接收来自不同状态监测模块以及其他健康评估模块的

数据,根据状态监测层的输出和历史的评估值,主要评估被监测系统、分系统或部件的健康状态,确定这些系统是否降级。如果系统的健康状态降级了,该层会产生诊断信息,提示可能发生的故障。该层的输出包括组件的健康或健康程度(以健康指数表示)。



健康评估层主要执行诊断,本层的输出包括系统/组件的健康状态或系统降级程度,系统的健康状态可以用很多方式表示,例如灰度。

(5) 预测层。

预测层可综合前面各层的数据信息,评估和预测被监测系统、子系统和部件未来的健康状态。主要功能是对系统、子系统或部件在使用工作包线和工作应力下的剩余使用寿命进行估计。预测层可能报告系统的未来健康状态或者评估组件的剩余使用寿命。故障预测能力是PHM系统的显著特征。

(6) 决策支持层。

该层接收来自状态监测、健康评估和预测层的数据,并根据前面各层的输出结果做出相应的支持决策,为维修资源管理和其他健康管理过程提供支撑。决策支持层综合所需要的信息,基于与系统健康相关的信息,以支持做出决策,为维修提供建

议的措施(例如在故障发生前维修或替换部件)。

#### (7) 显示层。

该层具备与其他所有层通讯的能力,通过便携式维修设备、维修管理和操作管理实现 PHM 系统与飞行人员、维修人员的人机交互界面功能。该层的输出包括低层产生的输出信息以及低层所需要的输入信息。

以上 7 层结构中,一般来说,数据获取层、数据处理层、状态监测层和健康评估层位于飞行器平台上,是 PHM 的主要部分。针对元部件的全寿命周期健康管理,由于需要更强的计算处理资源,以及更加广泛、完整、全局性的数据资料和历史性档案,因此,预测、决策支持和显示层的功能主要由地面的相应健康管理子系统/设备来实现。

## 2 PHM 的推理方法

许多研究者都致力于开发 PHM 的各种推理方法<sup>[3-8,11,13,16,17,19-22]</sup>,这些方法主要分为 2 类:基于模型的方法和基于数据驱动的方法。

### (1) 基于模型的方法。

基于模型的方法结合了物理建模、先进的参数辨识技术与进化预测算法,一般用于可以获得系统的精确数学模型的情况下,通常需要建立被监视系统的一个数学模型(物理模型或统计模型),这个模型与系统的物理过程直接联系起来,它使用残差作为特征,采用先进的算法来估计模型参数,其中估计模型参数与基准(健康的)模型参数之间的残差作为特征或诊断标量(Diagnostic Scalars),通过监视这些诊断标量实现故障的分类和预测。系统诊断标量的作用主要有:

- 被分类器(神经网络、模糊系统、Kohonen 映射)用来辨识和分类可能的故障模式;
- 评估故障损伤的当前等级;
- 预测故障的进程和部件剩余寿命评估。

基于模型的方法通过对系统的故障模式建模,监视有物理意义的系统参数,提供了一个极好的早期故障检测能力。在用于寿命预测时,也可以采用先进的知识融合策略(如神经网络、模糊逻辑等),综合各种故障模式(各种故障的发生概率不同)实现剩余有用寿命的预测。

使用基于模型方法的一个前提条件是:当系统存在故障时,残差足够大;而系统运行正常或出现正常扰动、噪声时,残差很小。

3 个主要产生残差的方法有:参数估计、观测器(例如卡尔曼滤波、降阶观测器等)和奇偶关系。

基于模型方法的 2 个优点是:

- 能够把对系统的物理解释融合到监视过程当中;
- 一般情况下,特征矢量的变化与模型参数密切相关,因而能够在变化的参数和所选择的预测特征之间建立一个函数映射。

而且,随着对系统性能降级了解的增加,模型能够自适应地改善精度和发现微小的性能问题。

### (2) 基于数据驱动的方法。

基于数据驱动的方法是基于模式识别理论的统计和学习技术,是一种数据挖掘方法或机器学习方法,这种方法通过历史数据学习系统的行为(如采用人工神经网络对系统行为建模)。

数据驱动的方法综合了已有的和先进的诊断和预测技术,在这个方法中,系统的健康状态可以通过对特定数据特性/特征进行监控来隐性地表示,这些特定数据/特征被用来评估系统的真正健康状态。在数据驱动预测过程中,数据按照一定的周期被采集,然后通过不同的特征提取算法可以从原始数据中计算出相关的健康特征。每组特征被输入到故障分类系统,分类系统能够把特征值与系统的当前状态联系起来。基于数据驱动的方法也会使用先进的融

合策略以便把运行模式信息和分类器的输出联合起来,产生一个融合的健康状态评估。最后,预测功能存储了系统运行过程中的分类和融合信息以预测系统的剩余有用寿命。

基于数据驱动的方法可以采用传统的数值算法,例如线性回归、卡尔曼滤波、偏最小二乘法、主元分析、小波分析和快速傅立叶变化等方法,也可以使用机器学习和数据挖掘的人工智能算法,例如神经网络、决策树、模糊逻辑和支持向量机等。

基于数据驱动的方法依赖于一个假设:除非系统出现故障情况,否则数据的统计特征相对不改变。基于数据驱动的方法的优点是:

- 它并不需要目标系统的任何物理模型,而是根据历史数据模拟系统行为,因而开发费用相对较低;
- 能够将高维带噪声的原始数据转化为低维信息,用于诊断和预测,大大降低了算法的运行要求。

基于数据驱动方法的缺点是这个方法严重依赖于系统运行数据的质量和数量。

## 结束语

预测和健康管理工作伴随着新一代战斗机的开发而产生,最初应用于任务复杂度高、系统运行环境恶劣、对系统安全性要求高的航空航天领域,随着 PHM 技术的发展,其研究和应用已经涉及到航空、航天、汽车、电子等各个领域。目前,PHM 技术还处于发展过程中,虽然已经应用于一些工程系统的子系统级或部件级,但还没有完全实现工程化,随着各种推理技术的发展和成熟,PHM 将更多应用于飞行器的系统级以及各种工业系统。

本文有参考文献 22 篇,因篇幅所限不能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 晓霏)