



马小骏

民用飞机健康管理决策的不确定性分析

马小骏¹, 文振华², 左洪福¹(¹ 南京航空航天大学 民航学院 南京 210016; ² 郑州航空工业管理学院 机电工程学院 郑州 450015)

摘 要: 对飞机实施健康管理是保证飞行安全与经济的有效手段, 针对飞机关键系统健康管理决策的不确定性问题展开研究, 利用监测手段的原理分析了状态监测环节中引入的不确定性。分析了信号检测与处理、阈值确定过程中的不确定性因素, 分析了基于模型的寿命预测和维修决策环节中的不确定性来源。最后针对各个环节给出了相应的降低不确定性的对策。

关 键 词: 健康管理; 不确定性; 状态监测; 寿命预测

中图分类号: V219

文献标识码: A

文章编号: 1003-8728(2012)12-1944-05

Uncertainty Analysis of Health Management Strategy for Civil Aircrafts

Ma Xiaojun¹, Wen Zhenhua², Zuo Hongfu¹(¹ College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;² School of Mechatronics, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015)

Abstract: Health management is an effective way to assure the flight safety and economy. Aiming at the uncertainty of health management strategies, firstly we analyzed the uncertainty sources of the monitoring system based on the principle of monitoring approaches. Then the uncertainty factors in the signal detection and processing and threshold confirmation were explored and the uncertainty factors from the model used for life predication and maintenance strategy-making were analyzed. Finally, the corresponding tactics for reducing uncertainty in every stage were proposed in the paper, which provide useful references for designing prognostics and health management capacity of aircrafts.

Key words: health management; uncertainty; monitoring; life predication; aircraft; flight safety

飞机是可靠性要求极高、技术最为复杂的大型装备, 其可靠性、经济性、保障性及维修保障能力的设计是制约其发展的关键技术之一。采用预知维修策略是解决航空安全与维修成本这对矛盾体的有效途径, 进而实现飞机持续安全、健康运行的总体目标。飞机上主要的关键系统(如发动机、飞行操纵系统、控制系统、起落架系统、空气调节系统等)的性能优劣直接影响到飞机的整体性能, 如机动性、安全可

靠性及战伤生存率(军机)等。从这些系统的构成来看, 都属于机械、电子、液压、气动等多学科、多技术相互渗透、有机结合形成的多功能混合复杂系统。从引起这些系统性能退化或故障的原因来看, 往往是多方面的, 系统的性能衰退既有随着时间连续不断变化的典型状态特征参数, 当超过某个设定的阈值而使得某个元件或子系统失能引起系统故障或失效; 同时也有可能受某些离散的事件影响, 导致各个子系统之间的状态空间发生变迁, 进而引起或加速系统的故障或失效。对于这种系统内存在不同的连续和离散两类变量的系统, 我们称之为混合动态复杂系统, 简称为混杂系统。对这类系统进行故障诊断或预测的时候, 往往很难分辨出是由于机械部件还是电子控制部分或液压部分等的原因, 还是由于部件或系统性能衰退或随机事件引起的, 进行故障诊断或预测的时候, 往往

收稿日期: 2011-10-18

基金项目: 国家自然科学基金委员会与民用航空总局联合项目(60939003)和国家自然科学基金项目(51105344)资助

作者简介: 马小骏(1962-), 博士研究生, 研究方向为健康管理和维修决策, maxiaojun@comac.cc; 左洪福(联系人), 教授, 博士生导师, zhms@nuaa.edu.cn

给出的结论含有很大的不确定性, 这样导致很难做出正确的维修决策。因此, 要想真正实现健康管理, 必须解决飞机这些系统的状态监测、预测以及寿命预测等关键方法和技术, 为建立基于监测、诊断与预测的预知维修决策理论与方法并推广全机以及机群全系统的维修决策优化奠定基础。主要针对健康管理决策制定的各个环节, 分析引起决策不确定性的主要因素, 并给出相应的对策和建议。

1 故障预测与系统健康管理

以航空发动机的健康管理为例, 其流程及功能描述如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 对发动机进

行健康管理的基础是利用先进的传感器技术集成, 借助各种算法和智能模型, 来完成系统的状态监测、预测, 然后依据诊断或预测信息(预先诊断部件或系统完成其功能的状态, 包括确定部件的残余寿命或正常工作的时间长), 可用的资源, 使用需求对维修活动做出适当的决策^[1], 确保全寿命周期的成本最低。在实施健康管理的过程中, 从最前端监测系统的传感器开始到最终的维修决策制订, 每一个环节都对最终决策的合理与否, 有着不同程度的影响。如果决策制订所需要的信息不确定性很大, 将很难保证决策的及时性、准确性、合理性, 必将带来安全隐患和经济浪费。

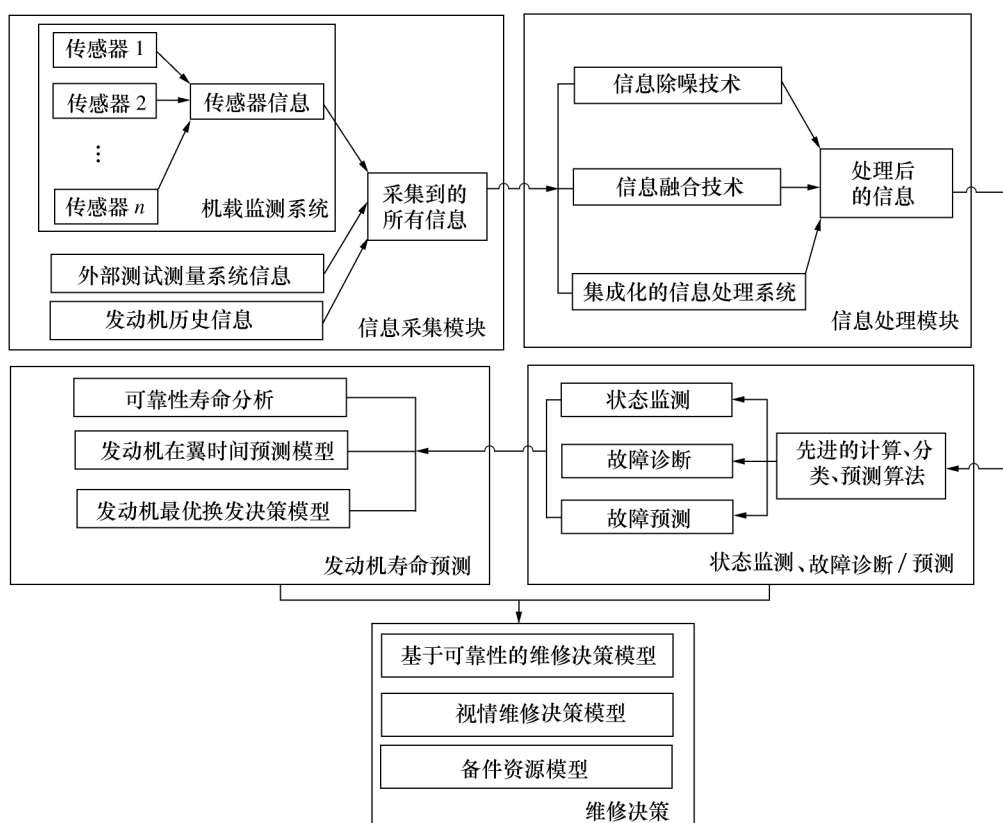


图 1 发动机健康管理流程及功能描述

2 不确定性来源分析

2.1 状态监测的不确定性

从图 1 中可以看出, 监测系统作为整个决策链中的信息源头, 是健康管理系统中最为关键的环节, 因此监测信息所含有的不确定性将对整个决策的不确定性有着最为直接的影响。其中, 在状态监测环节引入的不确定性主要来源两个方面, 一是现有的监测信息不完备, 二是由于监测手段或监测方法原理本身引入了部分不确定性。

监测信息的不完备性: 由于系统常常是由大量的元部件或子系统构成, 对每一个部件而言, 都具有

多个可测量的性能参数, 也就是说具有大量的潜在的失效源, 而且这些元部件或子系统之间具有非常复杂的性能相关性, 由于受工作环境或结构的限制, 很难在元部件的层次上实施监测, 导致监测覆盖范围不足, 获取的状态信息不完备。以航空发动机为例子, 振动监测通常也只是在高压压气机和高压涡轮两个部位实施监测, 而反应的都是整体的性能变化, 很难确定到是哪个部件(轴、轮盘还是叶片)导致的振动异常; 对燃烧室内壁的检测, 由于高温环境的限制无法采用在线的方式进行实时监测, 通常都采用离线孔探监测的方式。

监测原理引入的不确定性: 传感器技术是监测手段的核心基础, 目前对飞机各个系统进行状态监测的传感器采用的是非电量的电测方法, 如速度、加速传感器等都是将待监测的物理量转化为电信号, 这种利用材料的物理特性, 如感应距离的远近, 受压迫引起材料形变等, 将一个非电类的信号转化为电信号后输出。这种不同类型之间的信号变换精度往往依赖于传感器的敏感材料的特性。也就是说要求传感器的敏感材料在可测范围内具有很好的线性特性或遵循某一确定的规律, 传感器技术通常都很难达到这种绝对理想的状态。环境(如温度、振动、噪声等)都会对传感器的某些特性(如灵敏度、线性度等指标)造成与被测参数无关的输出, 如零点漂移等。

此外, 传统的转速、压力、流量等都是通过一个相应的稳态系统实现的, 这种系统性能稳定, 测点数多, 通用性好, 采样速度低, 对于发动机稳态性能的评价非常适用, 同时也在航空领域得到了广泛应用。但是如果用来对发动机的过渡态性能进行评价, 就显得有些不足, 不能较好地反映发动机的瞬时性能。这不利于对航空发动机健康状态做出准确实时的评估。

2.2 信号检测与处理过程的不确定性

传感器的输出信号通常都是非常微弱, 而且混杂有不同程度的噪声, 尤其在较为恶劣工作环境下, 噪声往往都淹没了有用信号, 导致信号的特征难以有效提取。因此, 一些必须的硬件检测设备如前置放大器、滤波器等用来对微弱传感器信号进行放大滤波处理然后送到处理器进行后续处理。整个流程如图2所示。结合这个图, 我们分析一下信号在整个处理和传递的过程中会存在哪些误差导致了最终决策的不确定性。

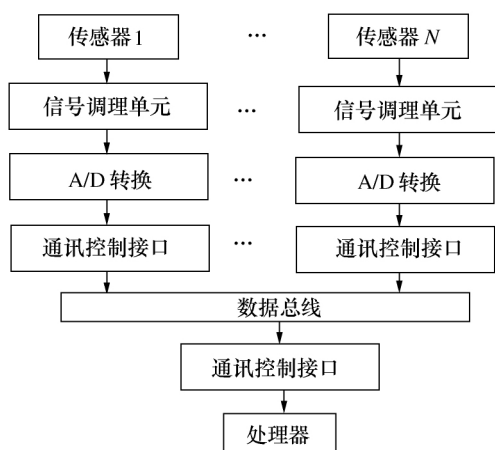


图2 传感器信号处理流程图

众所周知, 在对被监控系统实施监测, 进行健康状态评估时, 有关系统结构、状态、输出等方面的信息是非常重要的、不可缺少的。但由于对系统的了解程度及各种测试手段、估计方法、计算速度等诸多因素的影响与限制, 我们通常不能完全得到这些过程的全部信息。虽然就系统状态本身而言, 是一个连续变化的过程, 但由于传感器和计算机采样方式、运行速度等方面的原因, 我们只能得到采样时刻的状态信息。因此, 只能根据这些采样数据(而不是全状态过程的数据)进行系统的趋势预测和状态评估。

具体到检测系统中来说, 就是检测系统的AD转换器是将模拟信号转化为数字信号, 通过一定的采样频率对模拟信号进行采样, 采样频率越高, 所获得的数字信号就越接近于原始的模拟信号, 然而过高的采样频率会导致通讯网络上数据量的剧增。虽然根据Nyquist-Shannon理论, 采用大于所要求分析信号频率的两倍进行采样后, 能够获取到足够的采样数据用于评估信号的成分, 但是仍然不足以完全恢复原始的模拟信息^[2]。此外采样频率的选择还会导致信号的局部峰值衰减^[3]、混频^[4]、相位滞后^[5]等等。尤其对既有未知干扰又有未建模动态不确定性的非线性随机系统而言, 采样间隔的大小对这类系统的性能指标究竟有多大的影响很难给出一个定量的刻画。

此外在模数转化的过程中, 转换器的位数决定了其分辨率, 一个模拟信号的幅值被转化为一个由0和1组成的字符串, 其长度由AD转换器的位数来决定。对于小于分辨率的模拟量的变化, 其对应的数字量是不会有变化的。此外检测系统的校正误差、线性度、增益、漂移等都会不同程度的影响到测试的准确性。

影响测试结果不确定性的另外一个因素就是噪声, 包括来自系统内部元器件的热噪声、系统外部的电磁干扰、电源干扰以及地电位差和温度变化引起的噪声等^[6]。为了便于信号特征有效提取, 很多用于信号降噪处理的方法如FFT、小波变换、EMD、独立分量分析等近些年来都被得到了广泛的应用并展开了深入的研究和发展。然而, 不同条件下, 信号的构成和特点都有所差异, 因此, 没有一种方法是能够处理任何一种信号且不丢失有效成分。

2.3 阈值的不确定性

确定阈值的过程实际上是建立定性描述的语言值和定量表示的数值之间的转换模型, 实现数值和符号值之间的随时转换, 建立定性和定量彼此相互联系、相互依存的映射关系。

当连续变量穿越阈值使得状态使能或失能, 可以按照某个连续变量的值划分系统空间, 相邻状态空间分解面上连续变量的值定义为阈值。当连续变量超过或低于阈值时, 系统的状态空间会发生变迁。通过阈值的确定将一个定量的描述状态的连续变量转化为了一个定性的描述状态的离散变量, 往往可以用来作为一个离散事件的触发, 如报警, 或关闭某开关等, 这样作用于相关的子系统, 使得系统的工作条件和环境发生相应的变化。从混杂系统的特性来说就是离散状态的变化改变了连续变量所遵循的变化速率。

确定阈值是在整个健康管理流程中, 几乎每一个环节都必须解决的问题。当前飞机上的这些关键系统, 包含大量高度交互且相互影响的机械、电子、液压和气动元件。任何一个元件上某个性能参数的微小变化, 都有可能会导致其它参数的变化, 因此对每一个参数设置一个合理的阈值是相当困难。此外考虑环境因素在寿命周期内, 所处的环境与运行条件的差异, 固定的阈值可能不足以体现系统参数的可变性。

2.4 剩余寿命预测的不确定性

产品的失效是由于物理、电、化学、机械应力综合作用导致的结果。确定失效机理除了选用合适可用的失效模式外, 还要结合潜在的失效模式与失效原因进行分析。当使用基于物理的方法进行寿命预测, 力图实现对系统失效时间进行定量时, 存在模型的可用性和预测不确定性问题。

具体说来, 对一个系统而言, 由于空间、环境、设计以及人为因素等原因, 部件性能特征参数的连续褪变、外界偶然的离散事件等相互作用, 使得子系统/部件失效不再是独立的失效事件, 而是一个相关失效模式。目前的绝大多数相关失效概率模型都是以系统出现过的相关失效事件为依据的经验模型。由于相关失效事件稀少, 所以应用经验模型预测相关失效概率, 无法避免严重的不确定性。在单应力失效情况下, 不能使用多重应力失效模型; 在多应力条件下, 不能使用单应力模型。

如果没有明确的失效模型可用, 监测参数的选择只能基于过去的现场失效数据或者通过加速试验得来的经验模型。因此我们进行寿命预测的方法通常都是采用系统的历史数据和当前的状态监测信息, 借鉴经验模型进行系统的剩余寿命预测。而且, 大多数相关失效模型都是假设失效率为常数的静态模型, 这种假设在很多情况下是不成立的, 尤其对于这种机电液的混合复杂系统。

从前面一节分析知道, 由于监测手段、检测仪器和信息处理方法带来了一定程度的不确定性; 此外还有特征参数提取的不确定性以及失效评价标准的不确定性等都是寿命预测的不确定性分析所面临的挑战。更为重要的一点是, 在对系统的寿命预测的过程中, 由于对未来的使用环境和条件的不确定性, 导致预测的结果都存在很大的不确定性。在设备使用过程中受到载荷、环境及材料自身等因素的影响, 而且这些因素是随着时间而变化的。当前采用的考虑不确定性因素影响的方法通常认为机械零部件或系统的强度和工作应力分别服从某种概率分布函数, 但却不能给出强度和应力随时间变化的数据。实际上, 强度和工作应力状态在使用寿命期间是一个时变的演化过程, 因而其可靠度和剩余寿命也是一个随时间变化的动态可靠度和剩余寿命, 此外这些不确定性因素发生的时间顺序对于系统的寿命也会产生很大的影响。

此外, 对于那种间歇性的失效预测就更为困难, 如航电系统, 由于信号连接点的腐蚀问题引起产品的间歇性失效, 即使目前基于物理的损伤模型对此类失效预测也无能为力。

2.5 维修决策的不确定性

维修优化模型(包括定时维修和视情维修)的决策变量主要有部件的剩余寿命、更换/修理阈值和检查间隔期。该类模型的目标函数分为两类。其中单一目标包括停机时间的期望值最小; 单位时间内维修费用的期望值最小; 系统的可用度期望值最大; 可修复件的可靠性与安全性指标要求最高等。组合目标通常是费用和可靠性要求的组合, 包括在满足系统可靠性要求的基础上使系统的维修费用率最小; 在满足系统维修费用率最小的情况下使系统的可靠性要求最大化。

传统的维修决策是在假设信息完备的情况下做出的, 这种假设简化了维修决策建模问题, 也在一定程度上指导维修的作用, 但是由于假设条件是一种理想状态, 与实际工程情况存在一定的差异, 以此为依据制订的维修决策混入了一定程度的不确定性, 也限制了维修决策方法的实际推广和应用。

对于一个复杂系统而言, 其维修决策需要考虑到各个子系统之间、不同的元部件之间的故障、功能、结构以及经济等特征相关性, 由于这些相关性、相互间影响的存在, 导致在选择模型、制订策略的时候, 往往很难获得全部的信息, 也难在建模的过程中, 考虑所有的因素, 这样导致所获得的结论含有一定的不确定性。例如对于多层次系统, 所常用的建

模通常采用多级决策模型,只考虑上下层之间的关系,其目标函数具有单一性。

此外,所采用的决策模型不同,其所要求的输入信息范围、准确度等都不一样,其相应的输出决策也因此不同,而且模型本身的泛化能力都是具有一定限度,因此不同的模型对于具体的工程情况,其输出决策的不确定性总是存在,只是不确定性程度的差异而已。

3 降低不确定性的对策

当故障诊断和寿命预测结果的不确定性范围很大时,难以做出正确的维修决策,降低系统决策不确定性的根本方法在健康管理系统设计中,尽可能的减少不确定性的来源,建立有效的信息融合模型,充分利用各种实时监测信息、地面的检测信息以及历史数据,对系统的健康状态做出全面的评估和决策。

针对监测手段引起的不确定性:研究采用新型的传感器,增加监测范围和深度,如采用发动机气路静电监测方法能大大提高在线监测的范围和深度,提供更多的早期故障信息^[7],为后续的维修决策保证充足的时间;分析监测信号的特点,选择适用于不同信号的信号处理方法,提取信号具有代表意义的典型特征参数,以提高故障监测与故障定位的准确性。

针对阈值的不确定性:解决该问题的核心是建立一个实现数据离散化和概念分层中定量数据与定性概念之间的不确定转换模型,反映定性和定量之间映射的不确定性。建模过程中,充分考虑性能参数之间的相互影响和作用,确定合理的动态阈值,如采用基于自组织神经网络和粗糙集的动态离散模型,依据特征参数的重要程度确定离散区间数目,以此来实现阈值的动态确定^[8]。

针对寿命预测的不确定性:建立关键零部件的寿命与可靠性模型,优化物理损伤模型,来进行不确定性因素作用下的时变可靠度评估,提高剩余寿命预测的准确性。针对相关性失效预测问题,可以考虑通过系统相关失效机理分析,得到零部件失效概率变量的概率特性。通过零部件的失效概率看作为应力的函数,因此这个条件失效概率本身为一随机变量。根据应力强度干涉模型建立基于零件条件失效概率分布的系统相关失效概率模型,来获得计算系统相关失效概率的数学表达式^[9]。

针对维修决策的不确定性:首先可以考虑对于每个环节的不确定性评估建立相应的评估模型,为后续的维修决策制订提供定量的参考依据;对现有

的信息进行模糊化和不确定性处理,研究基于模糊和不确定性信息的维修决策方法,如基于模糊理论的马尔可夫过程等^[10,11];基于信息融合的维修决策,将信息融合技术引入到维修决策中,利用信息的多源性弥补单一信息的不足,以提高对决策支持的信息。

4 结论

针对民用飞机关键系统健康管理决策的不确定性问题,详细分析了引入不确定性的各个因素,并针对不确定的来源,给出了在健康管理系统设计时相应的对策和建议,以降低健康管理决策的不确定性,为系统的健康管理能力设计提供了参考依据。目前,对于不确定性的分析和处理都是分阶段的,不确定性在各个阶段之间的传播及其在整个过程中的传播规律是一个还未解决的难题。研究不确定性在这种混合复杂系统中的传播机理是接下来将要进行的研究工作。

[参考文献]

- [1] 张宝珍. 预测与健康管理技术的发展及应用[J]. 测控技术, 2008, 27(2): 5~7
- [2] Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory[J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 2009, 47(2): 617~644
- [3] Stranneby D, Walker W. *Digital Signal Processing and Applications*[M]. Elsevier 2004
- [4] Luke H. The origins of the sampling theorem[J]. *IEEE Communications Magazine* 2002, 37(4): 106~108
- [5] Gyorki J. *Signal Conditioning and PC-based Data Acquisition: Handbook*[M]. IOTech, Inc 2004
- [6] 戴逸松. 微弱信号检测方法及其仪器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994
- [7] 文振华, 左洪福, 李耀华. 一种新的航空发动机气路监测方法[J]. 南京航空航天大学学报 2009, 41(2): 248~252
- [8] 文振华, 左洪福. 基于粗糙集-集成神经网络的航空发动机磨损故障诊断方法[J]. 中国机械工程 2007, 18(21): 2580~2584
- [9] 谢里阳, 李翠玲. 应力-强度干涉模型在系统失效概率分析中的应用及相关问题[J]. 机械强度 2005, 27(4): 492~497
- [10] Dong M, He D. Hidden semi-Markov model-based methodology for multi-sensor equipment health diagnosis and prognosis[J]. *European Journal of Operational Research* 2007, 178(3): 858~878
- [11] Kurd Z, Kelly T P. Using fuzzy self-organizing maps for safety critical systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2007, 92(11): 1563~1583