

# 面向复杂装备的信息融合式健康监测分析研究

邢晓辰, 王健, 司远征, 崔雪峰

(装备学院 装备采办系, 北京 101416)

**摘要:** 为解决当前复杂装备维修维护与状态监测所面临的问题, 提出面向复杂装备的信息融合式健康监测; 对复杂装备健康监测需求进行研究, 明确针对复杂装备开展健康监测研究的意义; 完成装备健康监测概念辨析, 明确将信息融合技术引入复杂装备健康监测的意义; 对信息融合技术国内外研究现状进行分析, 针对信息融合技术的数据级、特征级及决策级, 对各层级典型信息融合算法进行概要分析; 论文研究为后续进一步深入开展复杂装备信息融合式健康监测研究奠定了良好基础。

**关键词:** 复杂装备; 健康监测; 多源信息; 信息融合

## Research of Analysis on Information Fusion Health Monitoring for Complex Equipment

Xing Xiaochen, Wang Jian, Si Yuanzheng, Cui Xuefeng

(Department of Equipment Acquisition, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

**Abstract:** In order to solve the current problem of maintenance and condition monitoring for complex equipment, research on information fusion health monitoring of complex equipment has been proposed. Study of complex equipment health monitoring requirements is carried out, and the meaning of health monitoring research for complex equipment is clear. The conception of equipment health monitoring is completed, and the significance of introducing information fusion technology to complex equipment health monitoring is analyzed. The status at home and abroad of information fusion technology research is analyzed. Aiming at the data level, feature level and decision level of information fusion technology, the typical information fusion algorithms for all levels are mainly analyzed. And a good foundation of further research of information fusion health monitoring for complex equipment has been laid.

**Keywords:** complex equipment; health monitoring; multi-source information; information fusion

### 0 引言

复杂装备在现代化工业中发挥着重要的作用, 一旦装备发生故障或者出现健康状态劣化, 会严重影响生产效能和工作效率。因此, 为了减少由于装备故障所带来的经济损耗、时间消耗、危险度增加等问题, 装备尤其是复杂装备的健康问题日益受到愈加广泛的关注。当前, 针对装备所开展的故障诊断多采用定期维修方式, 此种预防性维修方式相比于传统的事后维修方法提高了装备健康维护的主动性, 但容易造成过度维修或维修不足, 主要是由于定期维修无法有效利用装备的寿命分布规律。

针对这一情况, 基于状态的维修 (condition based maintenance, CBM) 即视情维修应运而生, CBM 通过设置相应的传感器, 基于所采集到的装备部分参数对装备健康状态进行评估, 进而基于装备健康状况确定维修的时机与强度。据美军统计资料显示, 如果投资 1~2 万美元用于装备状态维修, 每年将节省 5 万美元的费用。日本企业在实施 CBM 后, 设备故障率减少了约 75%, 维修费用降低了 25%~50%。随后, 以 CBM 为基础的故障预测与健康 (prognostic and health management, PHM) 得到了极大的促进与发展。相对应, 作为装备健康管理中极其重要的一环, 装备健康监测 (equipment health monitoring, EHM) 技术也得到了学术界的广泛关

注。装备尤其是大型复杂装备在执行任务的过程中会产生大量类型丰富的状态测试参数, 如何充分高效地利用这些状态测试参数, 对提高复杂装备健康监测的可靠性与准确度具有重要意义。鉴于此, 本文对面向复杂装备的信息融合式健康监测进行总体性的研究与分析。

### 1 复杂装备健康监测需求分析

针对复杂装备开展健康监测研究, 具有重要的意义, 主要体现在以下两个方面:

1) 实现视情维修, 大幅降低复杂装备维修保障费用。

当前, 我国装备使用部门针对装备健康状态检测主要采用定期检修与事后维修相结合的故障检修方式。采用此种检修模式, 在每次任务准备阶段和任务完成后, 都要进行大量的检测与维修, 覆盖面大, 难度和费用比较高。在设备未出现故障时进行定期检修, 反而可能会破坏设备正常的性能状态, 甚至造成不必要的停机; 进行事后维修时, 通常表明设备已经出现了较为严重的故障。此两种方式, 均无法充分保证加装备在执行任务中的可靠性与高效性开展复杂装备健康监测研究, 通过实时 (或准实时) 的状态监测, 能够及时识别复杂装备健康状态, 实现视情维修, 降低系统维护费用。

2) 减少经济损失, 避免重特大事故发生。

复杂装备具备“结构复杂性、功能多样性、系统架构强耦合性”等特征, 针对其开展健康监测研究具备很大的挑战。因此, 复杂装备在执行任务的过程中, 一旦出现故障, 将造成极为严重的后果。尤其是针对大型复杂装备在执行“急、难、险、重”任务时, 一旦发生故障会严重阻碍任务的顺利实施,

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2016-11-08。

作者简介: 邢晓辰 (1988-), 男, 山东菏泽人, 博士, 讲师, 主要从事装备采办信息化、信息融合与健康监测技术方向的研究。

甚至造成财产巨额损害乃至人员伤亡。针对复杂装备开展健康监测研究,在状态出现劣化或者故障程度相对轻微时,即采取有效措施进行干预,能够最大程度避免故障的发生或者故障程度的恶化,尤其是能够避免重特大事故的发生,减少经济损失。

鉴于此,有必要将健康监测技术引入到复杂装备状态监测与故障诊断中去,通过实时(或准实时)地监测复杂装备健康状态,第一时间发现复杂装备的状态失效或早期故障,确保任务的顺利实施。

## 2 健康监测概念辨析

论文选取健康监测在几个典型应用领域的定义进行分析,文献[1]主要开展飞行器健康监测研究,认为健康监测是对一个飞行器系统工作状态正常与否的描述,通过对飞行器系统进行有效的状态监测、检测、故障诊断等,获取其准确、清晰的健康状态信息;文献[2]主要开展结构健康监测研究,将结构健康监测定义为利用集成在结构中的传感器,在线实时地获取与结构健康状况相关的信息,提取结构性能特征参数,识别结构的状态及损伤,对结构中的不安全因素,在早期就加以控制以消除安全隐患或控制安全隐患的进一步发展,为结构的维修、养护及管理决策提供依据和指导;文献[3]主要对桥梁健康监测进行研究,将桥梁健康监测定义为基于各种传感器对桥梁的动力响应信号进行采集,对采集的各种信号提取有用信息,进行结构损伤识别、模型修正以及载荷分析,进而评定桥梁健康状态。

为明确健康监测概念的具体内涵,对健康监测领域中比较重要的概念与名词进行分析,如表1所示<sup>[4]</sup>:

表1 健康监测领域中的基本概念分析

概念	定义(解释)
状态监测	基于传感器测量系统状态信息,选用适当的数据处理技术、信息融合技术以及推理方法,对系统当前健康状态进行实时(或准实时)评估
状态劣化	系统尚未发生故障,但系统状态相比正常状态已产生劣化,随着时间的推移,最终将演变为完全失效
故障检测	对系统参数(或元器件)进行监测或建模,分析其监测(或模拟)结果是否偏离正常状态
故障诊断	当系统出现故障时,基于传感器测试信息与适当的推理分析机制,明确故障发生的部位、机理以及严重程度

综合以上分析,论文对健康监测作如下定义。

定义1:健康监测。健康监测是指设置多数量、多类型的传感器实时监测系统状态信息,选取适当的算法或模型对采集到的多源测试信息进行数据处理、融合以及推理,实现对系统的实时(或准实时)状态监测与状态评估,明确系统当前健康状态,降低系统发生故障的风险,为后续系统的养护、维修及管理提供依据与指导。

在定义1的基础上,论文对复杂装备健康监测定义如下:

定义2:复杂装备健康监测。复杂装备健康监测是指针对复杂装备内不同类型组件如壳体、机床、刀具、模具等,选取合适的多类型传感器,采集各组件执行任务时的状态信息,基

于所采集的状态信息选用适当的数据处理算法、融合算法及推理机制,对各组件的健康状态进行评估。

## 3 信息融合技术需求分析

随着生产加工技术的不断进步以及国家经济实力的不断提升,未来可预见的一段时期内,不管是经济发展需求还是军事需求,复杂装备在各大任务中都将发挥越来越重要的作用,这也对复杂装备在执行任务时的可靠性与效率提出了更高的要求。

当前,我国针对复杂装备的健康监测研究并不能完全满足实际需求。事实上,复杂装备在执行任务时,内部各组件会产生大量状态测试信息,这些测试信息来源于不同空间(或位置)和(或)不同时间节点的多源、多类型传感器<sup>[5]</sup>。以空军某型复杂装备为例,其内部各组件在执行任务时所监测的液位、温度、流量、压力、阀门等模拟量、开关量、脉冲量信息多达数百路。论文将这些多传感器信息称之为多源测试信息。当前,研究如何利用复杂装备多源测试信息,提升复杂装备健康监测的准确度与可靠性,已迫在眉睫。

信息融合技术及其应用是当前国内外研究的热点领域之一,为充分利用复杂装备多源测试信息,解决我国复杂装备健康监测所面临的技术难题,很有必要开展信息融合技术研究,并将信息融合技术引入复杂装备健康监测。这是一个具备创新性的前沿课题,具有十分重要的理论意义。

将信息融合技术引入复杂装备健康监测,其意义主要体现在以下几个方面:

### 1) 融合同类型多传感器测试信息,提高阈值监测准确度

针对复杂装备中阈值监测型组件健康监测可靠性偏低的问题,可考虑设置多个同类型传感器,同时对组件状态进行监测。采用信息融合技术中的数据级融合算法,对多传感器测试信息进行融合,能够降低传感器测试或传输故障所带来的风险,有效提高组件阈值监测的可靠性与准确度。

### 2) 在时间维度上融合单传感器测试信息,实现阈值监测型组件状态劣化监测

为解决复杂装备中阈值监测型组件状态劣化监测困难的问题,引入预测技术,对单传感器测试信息在时间维度上进行融合,完成基于预测的组件健康监测。基于某时刻之前的一段状态实际测试信息,生成该时刻的预测值,采用某种判定规则对预测值进行判断,明确预测值是否存在突变,是否能够构成异常数据。求取异常数据趋势,基于某种判定规则完成组件状态劣化监测。

### 3) 融合不同类型的多传感器测试信息,实现复杂组件健康监测

采用基于单类型测试信息的阈值监测方式,无法有效监测复杂装备中复杂组件的健康状态。针对复杂组件健康监测,通常能够采集多类型的状态测试信息,不同测试信息能够从不同角度反映组件健康状态。采用信息融合技术对这些状态信息进行融合,能够从多角度、多维度出发,实现复杂组件健康监测。

### 4) 准确融合复杂装备健康监测中的多源决策,生成最终决策

对复杂装备中某组件进行健康监测时,基于不同的状态信息、采用不同的算法或模型所生成的决策间可能存在冲突。采

用信息融合中的决策级融合算法,对冲突决策进行融合,生成一个确定的、更准确的最终决策。

## 4 信息融合技术概要研究

### 4.1 信息融合技术国内外现状分析

国外尤其是美国对信息融合技术的研究起步较早,早在20世纪70年代,美国军方的研究机构即在潜艇声纳信号的处理上采用了融合的理念。1985年,美国国防部实验室联合理事会(joint directors of laboratories, JDL)成立信息融合专家组,对信息融合定义进行统一,并研究建立面向信息融合的公共参考框架。在学术研究上,美国成立了多个融合年会或学术组织,如SPIE传感器融合年会、美国三军数据融合年会、国际机器人和自动化会刊、IEEE的相关会议以及国际信息融合学会(international society of information fusion, ISIF)。其中,ISIF学会成立于1998年,从成立至今每年均会举办一次信息融合国际学术大会,用以介绍信息融合领域的最新研究成果。此外,国外许多学者也发表了很多具有代表性的著作,如Llinas和Waltz的《Multisensor Data Fusion》、Hall的《Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion》以及《Handbook of Multisensor Data Fusion》等<sup>[6]</sup>。

与国外研究相比,国内对信息融合技术的研究相对较晚,进展也稍显缓慢。20世纪80年代后期,国内才开始慢慢出现针对多传感器融合技术的报道。随后各科研院所、高校等单位逐渐重视,并出版了不少译著和专著,比较有代表性的有:周宏仁等人的《机动目标跟踪》、敬忠良的《神经网络跟踪理论及应用》、康耀红等人的《数据融合理论与应用》、刘同明等人的《数据融合技术及其应用》、赵宗贵等人的《数据融合方法概论》、何友等人的《多传感器信息融合及应用》、韩崇昭等人的《多源信息融合》以及装备学院沈怀荣教授等人编著的《信息融合故障诊断技术》等<sup>[7]</sup>。

与此同时,针对信息融合技术的研究与应用,国内外每年也都会产生大量的学术论文与学术期刊,这些论文与期刊都为信息融合技术的发展做出了贡献。

### 4.2 信息融合技术概要分析

针对复杂装备开展健康监测时,处理对象是系统内各组件多类型状态测试信息。结合不同组件健康监测信息特点,论文可以选用不同层级的信息融合技术。

#### 4.2.1 信息融合技术层级划分

信息融合按照系统的功能进行划分,可分为目标评估级、态势评估级、影响评估级以及过程评估级。此种划分方式主要是从系统功能的角度出发,其应用对象多为面向军事应用。根据融合处理场合的不同,将信息融合处理结构划分为集中式结构、分布式结构以及混合式结构。其中,集中式结构加工的对象是传感器原始数据,而分布式结构加工的是经过预处理的局部数据。此种划分形式,其应用对象多为目标航迹关联或航迹融合<sup>[8]</sup>。通常,按照系统中数据抽象层次的不同,信息融合可以分为3个层级:数据级、特征级以及决策级<sup>[9]</sup>。

为直观理解,3个信息融合层次的优缺点对比分析如表2所示。

#### 4.2.2 信息融合算法概要分析

信息融合是一门多学科交叉的新兴技术,针对不同层级融合,所选用的融合算法和关键技术通常并不相同。本节从数据

表2 息融合处理各层次优缺点对比分析

	数据级	特征级	决策级
传感器类型	同类	同/异类	同/异类
处理信息量	最大	中等	最小
信息量损失	最小	中等	最大
抗干扰性能	最差	中等	最好
容错性能	最差	中等	最好
融合性能	最好	中等	最差

级、特征级以及决策级3个层级出发,对信息融合技术各层级的信息融合典型算法,进行概要分析。

其中,数据级信息融合技术主要有加权融合算法、卡尔曼滤波、时间序列分析以及支持向量机等;特征级信息融合技术主要有主成分分析、神经网络及Rough集理论等;决策级信息融合技术主要包括模糊集理论、随机集理论以及证据理论。

应当注意,对多源信息进行特征级融合时,首先对信息进行特征提取,而后对所提取的特征进行融合并生成决策。有些时候,所提取的特征信息与原始信息在形式或构成上并没有本质区别。因此,诸如支持向量机、Rough集、神经网络等融合技术既可以应用于数据级融合,又可以应用于决策级融合,即信息融合技术各层级的算法并没有完全严格界限分析<sup>[10]</sup>。

## 5 结论

将信息融合技术引入复杂装备健康监测具有重要的意义。本文对复杂装备健康监测需求进行分析;对健康监测领域的重要概念进行辨析,进而完成健康监测与复杂装备健康监测概念定义;研究将信息融合技术引入复杂装备健康监测的意义;对信息融合技术国内外研究现状进行分析,研究信息融合技术层级划分,对应数据级、特征级、决策级,对各层级典型信息融合算法进行概要分析。论文研究为后续开展复杂装备信息融合式健康监测奠定了较好的基础。

### 参考文献:

- [1] 邱雷. 基于压电阵列的飞机结构监测与管理系统研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [2] 贾云龙,委玉奇. 大型复杂结构长期服役状态下的健康监测系统 [J]. 中国工程咨询,2011,1:28-30.
- [3] 杨栋. 桥梁健康监测信号的递归特性分析 [D]. 长沙:中南大学,2012.
- [4] Kalgren P W, Byington C S, Roemer M J, et al. Defining PHM, a Lexical evolution of maintenance and logistics [A]. Proceedings IEEE Systems Readiness Technology Conference [C]. 2006, 9: 353-358.
- [5] 陈伟根,刘娟,曹敏. 基于信息融合的变压器内部故障诊断方法 [J]. 高压电技术,2015,41(11):3797-3803.
- [6] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜,等. 多源信息融合(第二版) [M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [7] 康健. 基于多传感器信息融合关键技术的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [8] 潘泉,王增福,梁彦,等. 信息融合理论的基本方法与进展 (J). 控制理论与应用,2012,29(10):1233-1244.
- [9] 邢晓辰,蔡远文,赵乙缤,等. 加注系统信息融合式健康监测方案研究 [J]. 计算机测量与控制,2015,23(9):2945-2947.
- [10] 陈科文,张祖平,龙军. 多源信息融合关键问题、研究进展与最新动态 [J]. 计算机科学,2013,40(8):6-13.