

# 复合材料冲击损伤检测维护 对SHM技术需求分析

蔡禹舜<sup>1</sup>, 朱 昊<sup>1</sup>, 卿新林<sup>2,3</sup>

(1. 上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241;

2. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005;

3. 中国商飞北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

**[摘要]** 随着航空新技术的发展, 复合材料结构健康监测 (SHM) 技术成为飞机结构设计的热点。SHM 在设计过程中, 除了要考虑在技术实现方面的需求, 还应考虑实际维修工作和适航要求对 SHM 技术的需求。本文结合现阶段复合材料冲击损伤检测维护程序, 考虑 SHM 技术的发展趋势和适航要求, 分析了 SHM 技术运用后的维修场景, 提出了复合材料冲击损伤检测维护对 SHM 技术需求。

**关键词:** 飞机结构; 复合材料; 冲击损伤; 结构健康监测; 设计需求

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.078



蔡禹舜

研究员, 主要研究方向为民用飞机维修工程分析、复合材料结构维护策略制定及损伤检测与修理技术、技术出版物源数据分析等。

复合材料的比强度和比模量高、性能可设计且易于整体成形、抗疲劳和抗腐蚀特性好, 其在飞机结构中的使用成为趋势。复合材料结构的使用减轻了结构重量, 改进了飞机性

能, 降低了飞机的全寿命使用成本, 但由于其对冲击损伤的敏感性, 外界冲击往往导致内部已经产生分层、脱胶等缺陷, 而外表面却没有损伤迹象, 这给检测维护带来较大的负担。

伴随着高比例复合材料飞机的出现, 为解决由复合材料的损伤特点和可见性导致的维护问题, 引入了结构健康监测 (SHM) 技术。SHM 是集先进传感技术、损伤诊断、安全评估以及维护为一体的技术。通过在飞机结构上布置的传感器/驱动器网络, 获取与结构健康状况相关的数据; 对所获得的数据进行处理、分析, 结合结构的使用与维护历史, 确定结构的健康状态; 与结构剩余强度和寿命预测模型有机结合起来, 实现民航服役期内结构寿命预测及安全评估。SHM 技术分为 S-SHM (计划性 SHM) 和 A-SHM (自动化 SHM)<sup>[1-5]</sup>。

传统复合材料维修使用的无损

检测技术需要维修人员使用专用的仪器、设备或探伤材料对飞机特定部位进行的详细检查, 同时对于人员培训和资质有特殊要求, 增加了大量人力、工时和设备的投入; 而 SHM 技术在飞机制造时就将主要探测设备预埋在飞机结构上, 在维护过程中只需要对 SHM 系统进行操作, 通过 SHM 系统智能化判断分析, 就能快捷地获知结构状态, 大大提升维护工作的效率, 提高了经济性。

在 SHM 技术的开发过程中, 往往更多地关注技术实现方面的问题, 研究通过各类技术手段实现对于结构状态监测的方法和实现途径。但是, SHM 技术最终的使用, 是要落实到飞机结构的检测维护工作中去, 因此在 SHM 技术的规划和设计过程中, 损伤检测维护方面的需求是必不可少的输入之一<sup>[6-10]</sup>。

本文针对复合材料冲击损伤, 确定此类损伤的检测维护过程, 分析在

使用 SHM 技术后的检测维护场景,在此基础上,对 SHM 系统提出需求,协助 SHM 系统的构建和研发,保证 SHM 技术与实际维修场景相匹配。

### 复合材料冲击损伤检测维护过程

复合材料结构的冲击损伤可能出现在飞机运营的各个过程,针对损伤威胁,在飞机运营过程中需要采取各类维修手段,以消除损伤对安全飞行的影响。主要的维修手段包括:计划维修、地面巡检、特殊事件维修。

#### 1 计划维修过程

计划维修一般是从可靠性方案管理经验出发,基于经验进行预测性判断,确定实施定期检查的检查对象、检查方式、检查阈值和检查间隔,给出结构的维修任务。

计划维修过程中复合材料的冲击损伤检查和分析过程为:

- (1)对复合材料结构外表面进行目视检查,确认是否有外部损伤;
- (2)若存在外部损伤,对损伤位置进行无损检测,确认损伤尺寸;
- (3)若不存在外部损伤,对损伤位置进行无损检测,确认是否存在内部分层;无内部分层则检查结束,有内部分层则确认损伤尺寸;
- (4)若存在损伤,依据损伤数据,确认修理方案,实施修理。

从上述过程中可以发现,由于复合材料结构损伤的隐蔽性,对复合材料表面的目视检查无法确认是否有冲击产生以及是否存在损伤。这样的前提下,必须执行复杂的无损检测过程才能确认最终的损伤。

从计划维修的角度,确认冲击事件的发生、确认损伤的产生、确认损伤的尺寸和类型、制定修理方案,需要 SHM 技术的介入。

#### 2 地面巡检过程

地面巡检是在航前、航后对飞行前后的飞机进行绕机检查,以确认飞机在飞行或停放过程中是否发生明

显的损伤和故障。

地面巡检过程中复合材料的冲击损伤检查和分析具体过程为:

- (1)对复合材料结构外表面进行目视检查,确认是否有损伤;
- (2)若存在损伤,需要进行判断,确定后续处理措施(原样使用、临时保护、飞行限制、修理等);
- (3)若不存在损伤,则检查结束。

从上述过程中可以发现,地面巡检过程中,不会对复合材料内部的损伤进行确认,但是如果发现损伤,仍需要通过相关数据,确认后续不同的处理方式。

从地面巡检的角度,确认冲击事件的发生和确认修理方法需要 SHM 技术的介入。

#### 3 特殊事件维修过程

特殊事件维修是针对能够被飞行机组人员、地勤人员感知或飞行数据记录的特殊事件进行的检测维护活动,目的是为了对确定已经发生特殊事件或怀疑已经发生特殊事件的飞机进行检查,并通过修理或更换飞机部件使飞机恢复到适航可接受的状态。

针对复合材料的冲击损伤,特殊事件维修的执行过程通常如图 1 所示。

特殊事件维修过程中复合材料的冲击损伤检查和分析过程为:

- (1)对特殊事件相关记录进行分析,确认是否超过预设的阈值;
- (2)实施第 1 阶段检查,确认是否存在损伤;若无损伤,检查结束;
- (3)若第 1 阶段检查存在损伤,

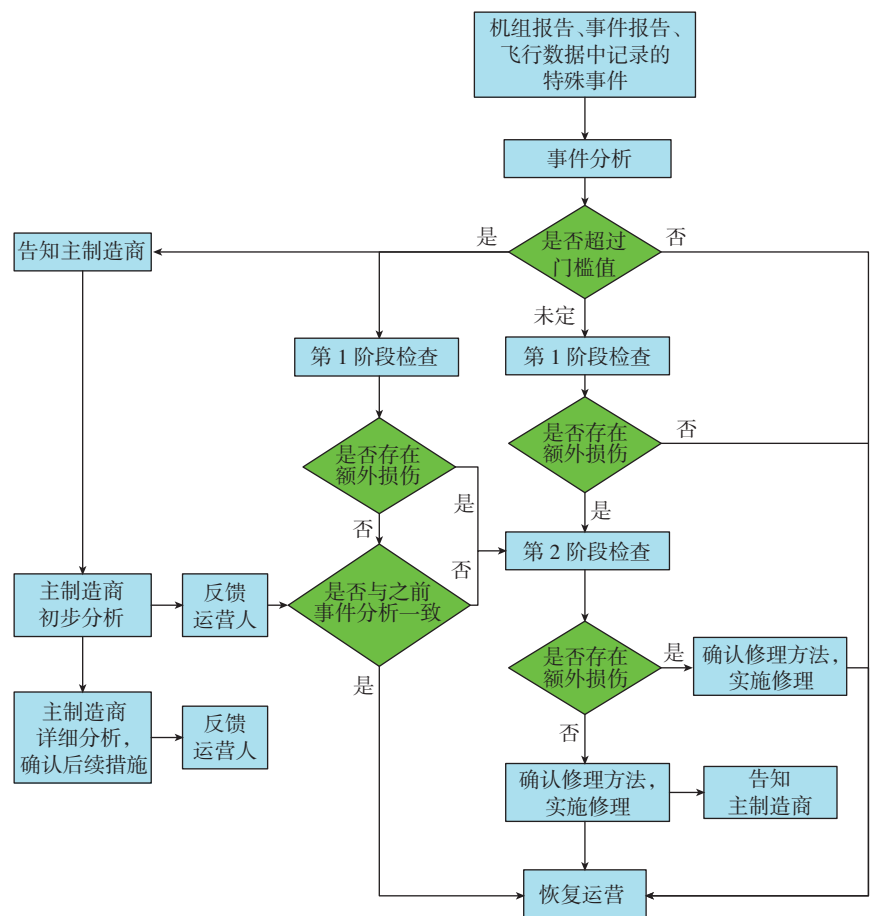


图1 复合材料的冲击损伤特殊事件维修过程  
Fig.1 Special events maintenance process of composite material impact damage

实施第2阶段检查,根据两次检查的情况,制定修理方案,实施修理;

(4)对于超过阈值值和第2阶段存在损伤的事件,需要告知主制造商,主制造商进行附加分析,并向运营人提供后续处理措施。

从上述过程中可以发现,特殊事件维修过程中需要对特殊事件程度和复合材料损伤范围进行确认,同时后续除了要制定修理方案,还需要对于损伤较为严重的事件进行深层次分析,以彻底避免特殊事件的影响。

从特殊事件维修的角度,确认冲击事件程度、确认复合材料损伤范围、制定修理方案、特殊事件分析,需要 SHM 技术的介入。

### 基于 SHM 的复合材料冲击损伤检测维护场景

从前文可知,在复合材料冲击损伤检测过程中,存在有大量的事件和损伤判断、损伤尺寸确认和修理方案编制等工作。对于复合材料冲击损伤来说,这些工作需要花费更多的人力、工时、设备。SHM 技术正是针对以上的问题,提供对于结构实际状态的监测和后续数据处理分析的功能。图 2 所示为在使用 SHM 技术后,复合材料结构冲击损伤的检测维护场景。

此场景基于较为完善的 SHM 技术运用而建立,整个场景由 5 个步骤组成:

#### (1)事件监测。

事件监测是代替传统维修工作中,人为检查确认是否存在损伤可能的过程。

一方面,通过传感器监测载荷等数据,表征外来物冲击的发生位置和冲击能量;另一方面,根据传感数据和预设的阈值进行对比,确认冲击的程度。其中,对于可能需要立即采取措施的高能冲击,应告知机组或机务人员并进行后续数据收集和监控;此时 A-SHM 优势较 S-SHM 显著。

若判断为较小冲击不会对结构产生影响,则直接记录数据后结束工作。记录的数据作为后续结构健康分析和预测的输入。这种情况 S-SHM 和 A-SHM 作用差异性不明显。

#### (2)损伤监测。

损伤监测是代替传统维修工作中通过无损检测的手段判断是否有损伤的过程。

对于可能造成结构损伤的冲击,需要完成损伤监测的工作,通过监测损伤状态,明确损伤的处理方式。FAA AC20-107B (复合材料结构损

伤容限设计与评定)中定义了复合材料飞机结构在制造与运营过程所包含的 5 类损伤,如图 3 所示。

SHM 技术的引入必须符合以上复合材料结构损伤检测与维修的适航要求,根据损伤程度,SHM 技术的检测维护要求为:

对于第 1 类损伤(低于允许损伤极限)和第 2 类损伤(允许损伤极限至临界损伤阈值),由于还在安全范围内,不需要立即采取修理措施,因此类型损伤可以不算做严重损伤,记录在系统数据库中,通过计

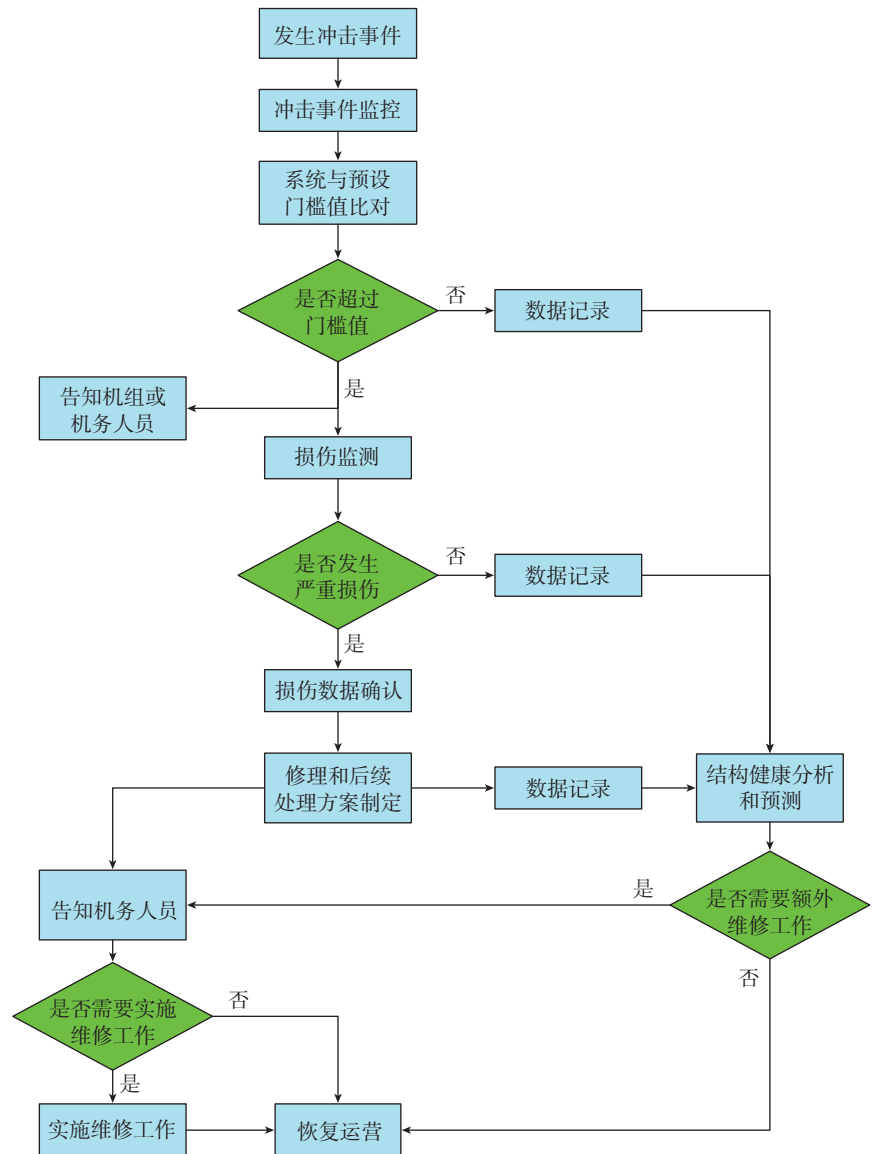


图2 基于SHM的复合材料的冲击损伤维修场景

Fig.2 Maintenance scene of composite material impact damage based on SHM

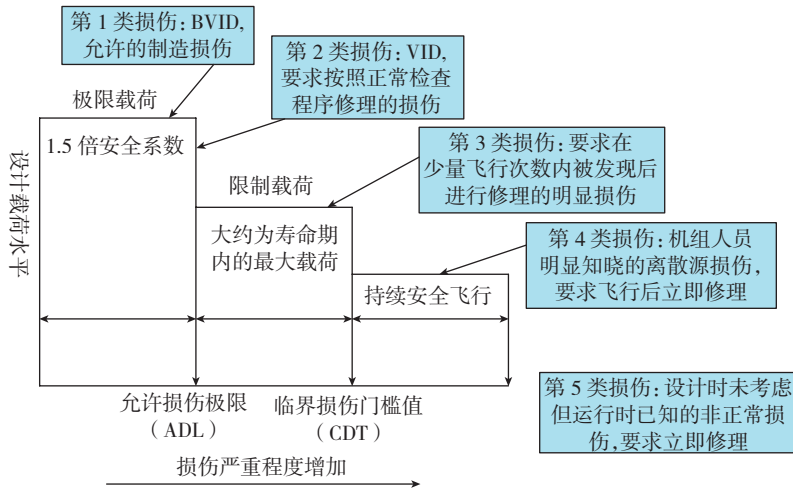


图3 损伤程度与承载能力  
Fig.3 Damage degree and carrying capacity

划 SHM 任务周期性提取系统数据和分析结论,按需实施维修工作,以减少不必要的维修工作。此时 A-SHM 和 S-SHM 优势不明显<sup>[11-12]</sup>。

对于第3类损伤(接近临界损伤门槛值)、第4类损伤(超出临界损伤门槛值)和第5类损伤(超出设计规范),由于影响到飞机结构完整性,需要短期内就采取措施,此类损伤算作严重损伤,需要触发后续的损伤数据确认和修理方案确定工作。此时 A-SHM 优势较 S-SHM 显著。

#### (3) 损伤数据确认。

损伤数据确认是代替传统维修工作中通过无损检测的手段确认详细的损伤范围和尺寸。

损伤的具体数据是制定后续处理方案的关键,除了通过 SHM 系统本身直接给出损伤数据,在无法确定的部分,可以提供额外检测的提醒和建议,确保能够高效而准确地收集到所需的各类信息。

#### (4) 维修方案制定。

维修方案制定是代替传统维修工作中,损伤评估和修理方案编制的过程。针对单次损伤进行分析,给出维修建议。

#### (5) 健康管理。

健康管理是基于 SHM 系统对于

损伤数据统计、收集、分析后,与持续适航文件、修理事例库等其他系统关联,完成最终方案整合的过程。它包括对结构状态进行长时间监控后,依据数据统计和算法,进行结构健康分析和损伤预测,最终给出相关维修方式的建议。

相关的建议不限于单纯的结构修理,也可以包括实施额外的检查、提供飞行限制等,以辅助系统确认结构状态。

### 复合材料冲击损伤检测维护需求分析

通过 SHM 技术运用的场景分析,可以确定在复合材料冲击损伤检测维护方面,对于 SHM 系统设计的需求。

#### 需求 A, 冲击事件监测需求:

(1) 实现对冲击事件的实时监测(优先考虑 A-SHM 技术);

(2) 设定门槛值,判断冲击能量的大小;

(3) 对于超过门槛值(可能产生损伤)的事件,需要触发报警,告知相关人员;不超过门槛值(不会发生损伤)的事件,需要记录冲击数据。

#### 需求 B, 损伤危害度监测需求:

(1) 实现对冲击损伤危害度的

检测;

(2) 对于 1、2 类损伤,需要对损伤数据进行记录,并能确定计划性的 SHM (S-SHM) 任务;对于 3、4、5 类损伤,需要触发报警,告知机务人员(优先考虑 A-SHM)。

#### 需求 C, 损伤数据确认需求:

(1) 实现对冲击损伤具体类型、程度、范围和尺寸的检测;

(2) 通过数据分析和逻辑判断,给出实施附加损伤数据确认工作的建议。

#### 需求 D, 维修方案制定需求:

(1) 与持续适航文件、修理数据库、客户服务系统等其他系统关联,实现整套针对冲击损伤的维修方案的编制功能;

(2) 处理分析单次损伤数据,实现维修方案或维修建议的制定。

#### 需求 E, 健康管理需求:

(1) 提供机务人员输入接口,实现额外检查工作结果、额外维修要求等信息的输入;

(2) 处理历史冲击、损伤数据,实现结构状态分析和损伤预测。

### 结论

复合材料凭借其优异的特性成为民机结构发展的趋势,在 SHM 系统的设计过程中,为充分发挥 SHM 技术优势,应该着重考虑其在实际维修工作中的状态,将维护的需求纳入到设计输入中。

本文按照维修工作程序类别划分提出了 SHM 技术开发的 5 部分需求,并针对 SHM 技术可能发挥作用的场景进行了分析:

(1) 从 SHM 技术实现的角度,建议对于第 1、2 类损伤可以优先考虑实施 S-SHM 技术,对于 3、4、5 类损伤侧重考虑实施 A-SHM;

(2) SHM 的设计按照从 A 至 E (冲击事件监测、损伤危害度监测、损伤数据的确认维修方案制定、健康管理)的顺序依次开发后运用到飞机

结构中,这不仅是因为从需求 A 到需求 E,实现的难易程度不断递增;也是因为这更符合飞机结构维修工作的流程,并满足现有适航要求。SHM 技术需求的依次实现能够便于 SHM 技术更好地纳入到现有的飞机维修体系。

本文针对复合材料结构的冲击损伤这一典型的 SHM 技术运用场景给出了其对 SHM 技术的需求,对金属结构和其他损伤形式的 SHM 技术运用也有较大的借鉴意义。

### 参考文献

- [1] SHIAO M, WU Y T J, GHOSHAL A, et al. Probabilistic structural risk assessment for fatigue management using structural health monitoring[C]// Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering 2012. Washington: SPIE, 2012, 8347(3): 53.
- [2] MARGRAF T, BARNELL T, HAVENS D, et al. Reflexive composites: integrated structural health management[C]//49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. AIAA, 2008.
- [3] ROY I, HAUGSE E D. Structural health management for aging aircraft[C]// Proceedings of the SPIE. SPIE, 2001, 4332: 60–67.
- [4] KENT R M, MURPHY D A. Health monitoring system technology assessments & cost benefits analysis: 2000–209848[R]. NASA/CR, 2000.
- [5] 卿新林,王奕首,赵琳.结构健康监测技术及其在航空航天领域中的应用[J].实验力学,2012,27(5): 517–526.
- QING Xinlin, WANG Yishou, ZHAO Lin. Structural health monitoring technology and its application in aeronautics and astronautics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(5): 517–526.
- [6] 高东岳.复合材料飞机尾翼结构健康监测监测技术研究[D].大连:大连理工大学,2014.
- GAO Dongyue. Study of structural health monitoring for a composite horizontal tail of aircraft[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [7] KESSLER S, SPEARING S, SOUTIS C. Damage detection in composite material using lamb wave methods[J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11: 269–278.
- [8] LIN M, QING X L, KUMAR A, et al. Smart layer and Smart suitcase for structural health monitoring applications[R]. AFRL-PR-ED-TR-2000-0025, 2001.
- [9] 郭永跃.基于压电晶片阵列的复合材料层合板损伤检测研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- GUO Yongyue. Research on damage identification for composite laminates with piezoelectric wafer active sensors array[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [10] SAE. Guidelines for implementation of structural health monitoring on fixed wing aircraft: ARP6461[S]. Boston: SAE, 2013–09.
- [11] FAA. AC NO 20-107B. Composite aircraft structure[S]. Seattle: FAA, 2009.
- [12] 蔡禹舜,卿新林,朱昊.基于结构状态的飞机维护策略研究[J].航空维修与工程,2015(9): 98–101.
- CAI Yushun, QING Xinlin, ZHU Hao. Research on aircraft maintenance strategy based on structural condition[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(9): 98–101.

通讯作者:蔡禹舜, E-mail: caiyushun@comac.cc。

## Composite Material Impact Damage Detection and Maintenance Requirement Analysis to SHM Technology

CAI Yushun<sup>1</sup>, ZHU Hao<sup>1</sup>, QING Xinlin<sup>2,3</sup>

(1. Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute of COMAC, Beijing 102211, China)

**[ABSTRACT]** Within the development of aviation technology, structural health monitoring (SHM) technology for composite material structure has been hot point of structure design. During the SHM system design process, maintenance work requirement should be considered besides the technology realization requirement. Based on the current maintenance process of composite material impact damage, this paper integrates the development tendency of SHM technology, analyses the maintenance scene based on SHM, and presents the composite material impact damage detection and maintenance requirement to SHM technology.

**Keywords:** Aircraft structure; Composite material; Impact damage; Structure health monitoring; Design requirement

(责编 铃兰)