

国外飞机预测与健康管理工作发展计划综述

张宝珍, 王 萍, 尤晨宇

(中国航空工业发展研究中心, 北京 100029)

摘要: 进入 21 世纪以来, 预测与健康管理工作 (PHM) 技术作为提高新一代武器装备和民用产品的可靠性、安全性和经济承受性, 实现自主式保障和基于状态的维修 (CBM/CBM+) 的关键使能技术, 引起各国军方和工业界的广泛关注; 欧美各国借助各种技术开发计划来大力推动 PHM 关键技术的开发、成熟和在军、民领域的应用; 对近 10 年来美国 NASA、欧盟和英国实施的几项 PHM 相关计划进行了概述, 介绍了各项计划设立背景、研究框架和特点、组织管理、研发重点等内容, 以期为我国发展 PHM 技术、制定相关技术计划提供参考借鉴。

关键词: 飞机; 预测与健康管理工作; 技术发展计划; 综述

Overview of Oversea Prognostics and Health Management Technologies Development Projects

Zhang Baozhen, Wang Ping, You Chenyu

(Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China)

Abstract: The Prognostics and Health Management (PHM) technology has been widely recognized as an enabler for improving reliability, safety and affordability of new generation weapons systems and commercial products, achieving autonomic logistics and condition-based maintenance (CBM) /enhanced CBM (CBM+). European Countries and the USA have been promoting the development, maturing of PHM critical technologies and their applications in military and civil areas through various technology investment projects. Accordingly, NASA IVHM project, European TATEM project and the WiTNESSS project including the background, research framework, characteristics, management structure and development focuses, etc were briefly introduced in this paper.

Keywords: aircraft; PHM; technology investment projects; overview

0 引言

近年来, 预测与健康管理工作 (PHM) 相关技术在航空领域得到广泛应用且显现成效。比如, 美国陆军航空与导弹司令部的阿帕奇 A 和 D 型号、支奴干 D 和 F 型号以及黑鹰 A、L 和 M 型号上都已安装了 HUMS 设备。装备 HUMS 设备的一个飞行大队, 其能执行任务率可以提高 5%, 同时飞行小时数增加近一倍。另外, 美海军 2012 年 7 月与古德里奇公司签订了一份 1 000 万美元的合同, 要求其在 2014 年 3 月底之前交付 120 套“健康与使用监测系统” (HUMS), 供美海军以及澳大利亚军队的某些直升机使用。在民用航空领域, 波音公司开发的飞机健康管理 (AHM) 系统已经扩大应用于全球 60 多家国际民航客运和货运公司的 2 000 多架飞机上, 其中超过 75% 的 B777 机队和 50% 的 B747-400 机队都采用了波音 AHM 工具提供实时监控和决策支持服务, 大大减少了航班延误, 节省了运营成本, 并支持民航机队长期可靠性计划的实现。2014 年 4 月, Acellent 技术公司结构健康监测系统在庞巴迪航空公司的首架利尔 85 公务机上, 标注着 PHM 相关技术进军公务机领域取得成效。

PHM 应用中涉及到诸多关键技术, 这些技术尚未完全成熟, 即便具有当今最高水平的 F-35 战斗机的 PHM 系统仍处于验证和成熟阶段。为此, 世界各国都在积极采取各种方式加速这类技术的开发和应用。比如, NASA 和欧盟都通过制定

和实施完整的技术发展计划, 逐步实现 PHM 各项关键技术的研发、成熟和应用。

1 NASA 制定专项技术预研计划, 构建集成设计与验证环境, 循序渐进地推进 PHM 关键技术预研及成熟

国外的经验教训表明, PHM 系统的实现不是一蹴而就的事情, 必须制定循序渐进的技术发展计划, 逐步突破各项关键技术。具体而言, 需要通过 PHM 关键技术预研, 然后通过集成设计和验证, 将 PHM 系统的成熟度从 2 级提升到 6 级, 转入型号应用。NASA 制定并实施的飞行器综合健康管理 (IVHM) 计划就是其中的一个典型实例。

IVHM 计划自 2007 年设立, 是 NASA 航空安全计划中的一个重要组成部分。NASA 制定的 IVHM 技术计划提供了 PHM/IVHM 系统的关键技术预研途径。IVHM 计划的长远目标是: 通过降低系统和部件中的偶然和基础性失效, 提高目前和下一代航空运输系统的安全性。子系统和部件方面的失效和危害占到飞机灾害性事故的 24%, 也是因飞行失控而造成的 26% 事故中的重要罪魁。NASA IVHM 计划随着世界环境的变化和高新技术的发展而不断得到更新和完善, 到 2009 年 11 月, NASA 公布了 IVHM 的 2.03 版本, 列出 2008—2012 年五年的路线图计划及详细的里程碑和度量指标, 体现了 NASA 和美国宇航工业的目标和需求。路线图解决与航空安全有关的关键挑战, 包含了 NASA 针对目前的在研飞机雄心勃勃而现实的目标和 NASA 满足下一代飞机相关的长期需求的战略定位。

收稿日期: 2016-04-06; 修回日期: 2016-05-17。

作者简介: 张宝珍 (1967-), 女, 研究员, 主要从事国外航空产品“五性”及试验测试技术领域的情报研究工作。

1.1 IVHM 计划研究框架及特点

VHM 计划 2.03 版目标是：开发一套经过确认的多学科飞机综合健康管理工具和技术，使新一代飞机能够实现飞行中不良事件的自动化检测、诊断、预测和缓解。IVHM 计划中所有的节点和任务都与上述目标相关联^[1-3]。该计划的实施框架见图 1 所示的分层图，该图显示了 IVHM 内部的研究层次以及从基础研究到计划目标的逻辑关系。第 1 层的基础研究是支撑整个 IVHM 计划的基石，它涵盖了先进的传感器和材料、建模、先进的分析与复杂系统、验证和确认四方面工作；第 2 层是提供飞机主要子系统（飞机系统、机体、推进系统和软件）经核实的健康管理技术，支持第 3 层目标的实现；第 3 层主题层的目标是开发一个集成工具集，实现对飞行中不良事件的检测、诊断、预测和缓解。第 3 层代表了第 2 层分系统的多学科集成，形成关键知识产权主题；第 4 层代表了整合研究成果，实现计划的目标。

图 1 和图 2 分别代表 NASA IVHMr 计划的总体技术途径和相关的总进度。图 2 中的里程碑是通过对比 IVHM 计划战略目标的均衡考虑给出的。每个里程碑都有相关的一个度量指标以及指标合理性论据。每个指标都是根据对当时技术发展水平（SoA）的估计提出的。随着计划的演进，这些指标也将变化，以适应 IVHM 计划内部和 NASA 研究机构内、外形成的新知识水平。为及时掌握航空工业未来趋势及其对航空安全和 IVHM 的潜在影响，IVHM 计划在第 4 层设定了一项“系统分析”工作项目，负责跟踪调查该计划内部和外部的技术发展水平。一旦有新发现或新成果，“系统分析”工作项目负责向计划中的相关领域分发这些信息及其对 IVHM 的相关影响信息，从而使计划定期获得更新。

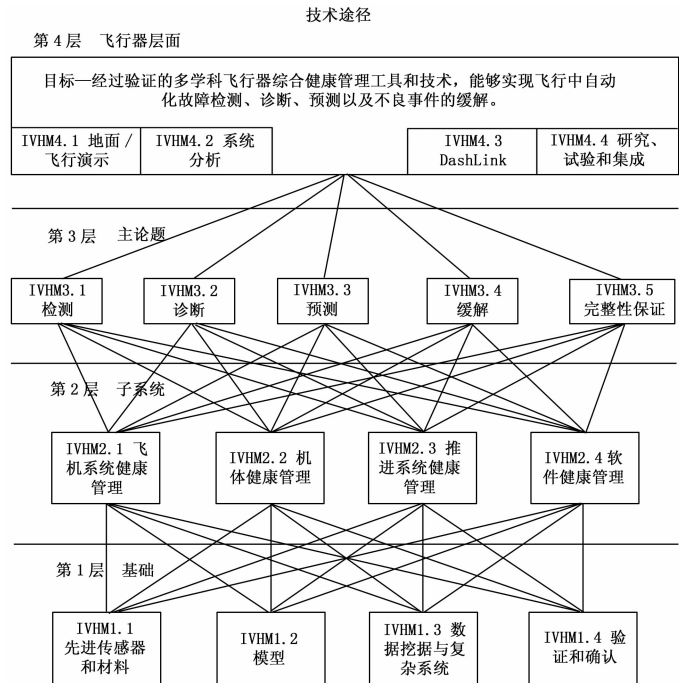


图 1 NASA IVHM 计划技术途径实施框架

由于 PHM/IVHM 多学科性质，IVHM 计划的一个必要组成部分是将研究成果、仿真和真实数据集、算法和其他相关文献对外公布。为此，IVHM 计划在第 4 层设立了一个航空系统健康发掘网址，即 DASHLink，专门用于对外发布上述信息，方便研究人员之间的信息共享。

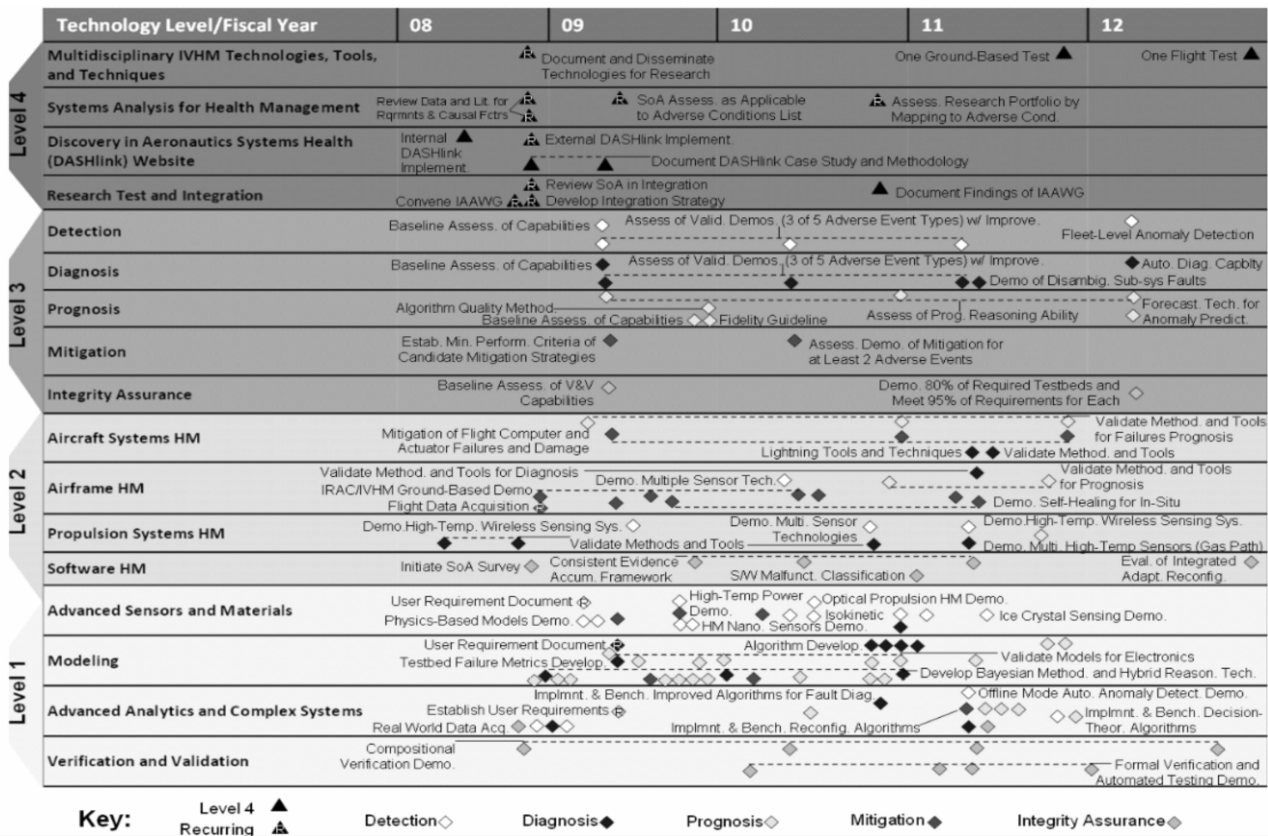


图 2 IVHM 在未来 5 年的主要计划节点

从图 1 和 2 可以看出, NASA IVHM 计划具有如下主要特点:

- 1) 设立里程碑节点和度量指标, 分层、并行推进各层次技术的研究;
- 2) 重视基础技术研究和 IVHM 技术的验证与确认;
- 3) 借助“系统分析”“情报研究工作, 随时跟踪掌握技术发展趋势, 对计划及时做出更新和调整;
- 4) 设立 Dashlink 网站, 建立知识沟通与共享机制;
- 5) 开发一种开放式体系结构, 便于将源自不同组织和人员的 IVHM 独立技术成果快速地集成、验证和确认。

NASA IVHM 计划在努力实现飞机和系统级自动化检测、诊断、预测和减弱不良事件的过程中涉及许多不同的研究领域。在系统级, 研究重点放在对实现计划目标的多学科一体化方法、工具和技术进行评价方面; 在飞机级, 研究重点是评价不同系统中的故障之间的交互作用以及对飞机健康的实际影响。一个 IVHM 系统不只是一组 IVHM 技术。这些技术必须共同工作在一种真实的环境中, 必须提供对安全性的显著改进, 从而证明研制、集成这些技术及其所花的相关费用是正当的。因此, IVHM 计划专门在第 4 层组建了由政府、工业界和学术界研究人员组成的研究试验与集成 (RTI) 工作组, 负责为 IVHM 计划中开发的研究成果编制研究试验与集成计划 (RTIP), 并负责协调集成体系结构与评估策略工作组 (IA&AWG), 促进 IVHM 系统集成与体系结构问题研究。

RTIP 是对 NASA IVHM 计划所研究技术的里程碑、要求、资源、试验策略和结果的汇编。RTIP 识别 IVHM 里程碑, 记录可用资产和资源, 提供里程碑到期日, 并提出试验方案需求。为便于纳入在 IVHM 计划实施过程中获得的新的试验设施, RTIP 是一个“活的文件”, 可以随着需求的出现得到更新。RTIP 在每年的第 2 和第 4 季度被正式提供给 IVHM 计划各方。新的试验设施可以出于各种不同的目的被引入 RTIP, 包括费效、补充的能力或联合跨计划活动。

1.2 IVHM 计划的组织管理

NASA 为 IVHM 计划组建了一支完善的管理队伍, 如图

3 所示为 NASA IVHM 计划的管理组。IVHM 计划由一名首席调研员、一名项目科学家和一名计划主任负总责。在计划 4 个层次中的各个工作项目都设有专人负责。其中, 在第 1、2 层设立了工作项目牵头人 (Task Lead); 在计划的第 3 层主题层设立了 5 名首席调研员助理 (API), 分别负责监管 IVHM 计划的 5 个主题领域 (检测、诊断、预测、减弱和完整性保证) 的工作, 并提供对飞机层面的技术水平的必要监督, 使整个飞机 IVHM 能力得以实现。NASAIVHM 计划管理组采用研究试验与集成计划 (RTIP) 维基百科 (wiki) 作为 IVHM 研究计划的一个主要的管理工具。

1.3 计划重组

当今飞行关键系统的复杂性对航空运输系统的安全保证提出严峻挑战。特别是, 验证和确认作为安全保证过程的一个有机组成部分, 是非常费钱的, 有些情况下还妨碍了新颖的使用和技术引入。而且, 即使在一个系统上完成了验证和确认, 仍可能出现错误, 因为该系统与其他系统间存在大量交互。为应对这些需求, 促成这些复杂技术和使用开发成果的验证和确认, 2011 年, NASA IVHM 计划转变为两个计划: 系统级安全与保证技术 (SSAT) 计划和飞行器系统安全技术 (VSST) 计划。SSAT 计划提供知识、方案和方法来主动管理飞行器和空中运输系统的设计和运行的日渐复杂性, 包括促成飞行关键系统改良的和经济可承受的验证与确认的先进方法。VSST 计划提供为避免、检测、减弱危险飞行状态和恢复正常飞行状态并保持飞行器适航和健康所需的知识、方案和方法。SSAT 计划是在 IVHM 计划基础上进一步将空中运输系统纳入安全考虑范畴。重组的原因: 从关注飞机本身转向关注整个空中交通系统, 从只关注飞行器的 IVHM 领域, 转向关注包括飞行器 IVHM、持续保障 (计划和完成检查、修理和返修活动) 和安全性设计领域在内的飞行器综合健康保证系统 (IVHAS)^[4-5]。飞行器综合健康保证比传统的飞行器健康监测系统面更宽。它是一种系统级方法, 综合设计要素、增强的人工检测技术 (地面)、飞行中的材料 (损伤) 缓解技术和先进的综合健康管理技术, 侧重于确保从飞行器设计阶段直至退役整个飞行器的健康。

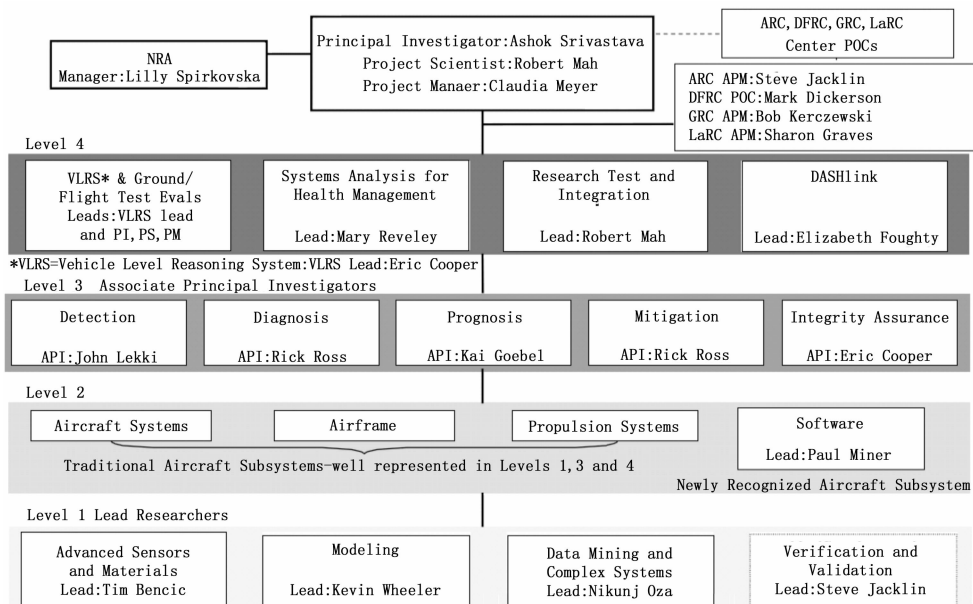


图 3 NASA IVHM 计划管理组

1) SSAT 计划: SSAT 计划正在为制造商和认证方开发新的工具和技术以及新的范式,用于改进当前和未来空中运输系统,提供高置信度水平的安全保证。这些工具和技术将促进飞行器综合健康保证系统工作方案的实现,这些工具将被转移给 FAA,联合规划与开发办公室、工业界、学术界和其他伙伴,以使公众受益。

SSAT 计划的目标是:确定风险,并提供安全管理飞行器和空中运输系统的设计和使用所需的知识,包括能促成对飞行安全系统改良的和费用有效的验证和确认的先进方法。具体包括:数据挖掘算法,以支持利用自动化数据分析工具来整合多种数据资源;研究改进型号取证的置信度和时限;为确定人和自动化在复杂系统中各自发挥的最佳作用开发改进的系统工程过程和工具。SSAT 计划的研究框架如图 4 所示。

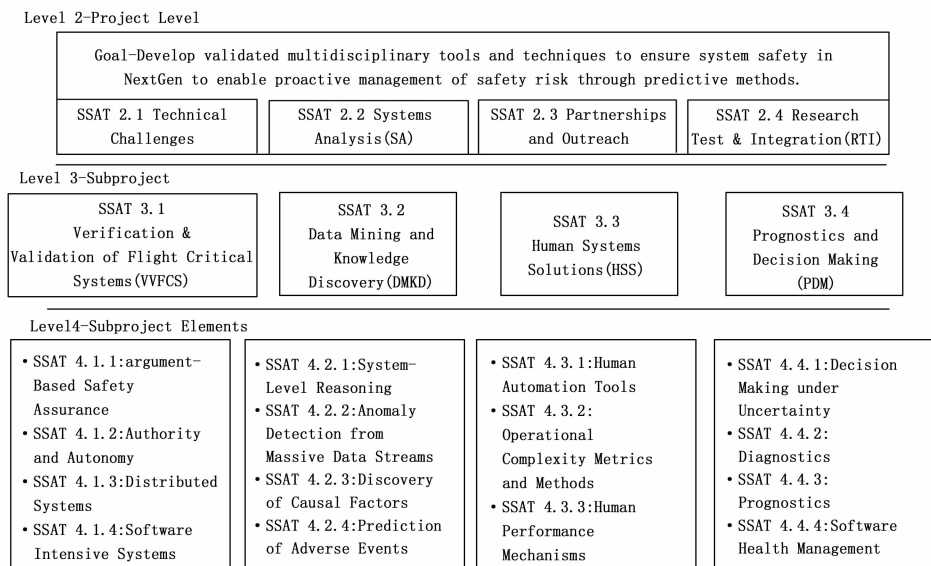


图 4 SSAT 计划研究框架

SSAT 计划从解决以下 4 方面技术挑战入手来实现其计划目标。

(1) 飞行关键系统的保证:为制造商和认证方开发验证与确认工具,以费用和时间有效的严格方式确保飞行关键系统的安全。到 2025 财年,利用地面和机载系统的统一安全保证过程研制安全、快速和费用有效的下一代航空运输 (NextGen) 系统。(2) 安全事件的挖掘:开发能利用飞行器和系统数据来准确确定潜在事件或事故征兆的技术,进而掌握和预测包括空域系统和飞行器在内的整个系统范围的安全关注问题。到 2019 财年,自动挖掘 10TB 以上异类的航空安全事件几种以往未知的征兆。(3) 自动化设计工具:掌握对航空安全产生影响的人的行为关键参数。到 2020 财年,在下一代航空运输系统 (NextGen) 技术的整个设计寿命周期内纳入对人的行为考虑,从而提高人一自动化交互的安全性。(4) 预测算法安全性保证设计:通过有关根因的不确定性推理 (诊断) 来预计复杂系统的剩余有用寿命,并预计跨多个系统的故障及剩余有用寿命 (预测)。到 2025 财年,开发经验证的预测算法,帮助移除型号取证的障碍。

2) VSST 计划:从旅客和货物运输的持续增长所产生的

公众效益取决于对当前和未来航空器固有安全属性的改进。航空安全计划 (AvSP) 通过开展前沿基础研究,产生从学科级到分系统级和系统级的创新算法、工具、方案和技术来应对该挑战。作为 NASA 航空安全计划的一个组成部分,飞行器系统安全技术 (VSST) 子计划的目标是:“开发增强的飞行器设计、结构、系统和运行方案和技术,以促成安全事故和事件的下降。该计划主要侧重于从应对三方面技术挑战 (TC) 入手,来改进单个飞行器的安全性:(1) 改进机组在复杂形势下的决策和反应 (CDM); (2) 保持重大检查之间的飞行器安全 (MVS); (3) 在危险状态下确保安全和有效的飞机控制 (ASC)。这三方面技术挑战如图 5 所示,每种挑战都解决一种事故的重要促成因素,还考虑了未来事故因素的新兴趋势。该计划重点放在解决单个飞行器的安全性而非整个机队的问题。

其中的 MTV 技术挑战旨在保持飞行器重大检查之间的安全性,它是通过开发和验证新型综合健康管理与失效预防技术,来确保飞行器系统在重大检查期之间的完整性以及在飞行中保持飞行器态势感知来实现的,它致力于在 5 年内 (2012—2016) 帮助提供飞行器综合健康保证系统分系统级关键技术和工具。

2 欧盟开发用于维修新方案的技术与方法 (TATEM 计划)

2004 年 3 月,在欧盟第 6 框架研发计划的资助下,由通用电气 (GE) 公司的航空系统分部 (前史密斯宇航公司) 牵头,由来自于欧洲、以色列和澳大利亚的 12 个国家的 58 家承包商 (后来增加到 60 家) 组成的团队启动了一项名为“针对新型维修方案的技术与方法” (TATEM)^[6-8] 研究计划。

该计划研究的是针对新型维修方案的技术和方法。TATEM 并不是由特定的事件或环境引发的,而是对民用飞机维修整体状况的一种响应。有数据显示,维修活动通常会占到一航空公司直接运营成本的 20%。过去 30 年来,尽管航空公司已经将很多维修活动外包,但该比例一直没有什么变化。而且,这其中还有个效率问题和安全问题。前者例如,航线技师通常会将维修时间的 30% 花在获取信息上。后者涉及人为差错,因为维修技师通常是在时间很紧的情况下完成任务的,这又会进一步

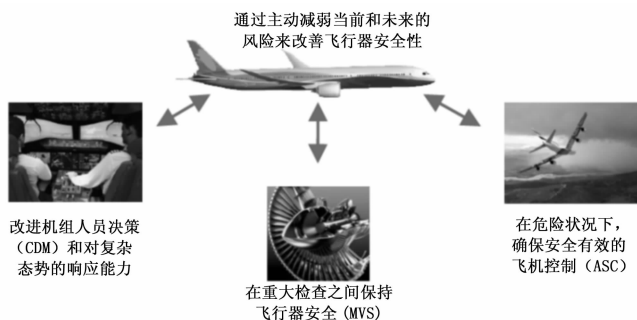


图 5 VSST 计划的组织图

带来约 15% 的事故。期望减少由维修造成的飞行延误, 正是推动 TATEM 研究的动因之一。

TATEM 计划试图通过预先维修、更灵活的维修进度安排、快速地面保养以及更有效的失效预防来提高飞机的可用性和利用率。TATEM 还寻求改善培训和减少人为差错的办法。这方面涉及的范围很广, 除了进一步提高飞机的可靠性之外, 还包括飞机维修的所有方面(航线、零部件、飞机检查、发动机等)费用的节省问题。欧盟有关文件称, 该计划无非是要“推出新的业务方式, 促使飞机运营和维修理念、新的产品机遇以及新的伙伴关系的形成和合作发生显著改变”。

2.1 TATEM 计划的 IVHM 体系结构

TATEM 计划通过下列方式实现飞机最大运营能力:

- 1) 健康监测与管理;
- 2) 飞机运营能力评估;
- 3) 面向过程的维修;
- 4) 可移动维修方法;
- 5) 灵活的维修计划。

TATEM 计划重点放在利用飞行器综合健康管理 (IVHM) 来改进安全和降低航空公司运营成本方面。IVHM 在地面上的实物维修基础设施上利用通用格式综合数据管理。它不需要专门的硬件。理想情况下, 当飞机还在空中时, 就能提供监测、诊断和预测功能, 并向维修技师提供应采取的措施建议, 以便在通常的再次出动准备时间内就能完成飞机的维修。TATEM 计划的主要技术重点放在: 航空电子、通用系统、发动机、结构、数据管理、地勤保障领域。

TATEM 计划选择了开放系统基于状态的维修 (OS-ACBM) 架构实施其物理集成, 作为完成下列任务的一部分:

- 1) 定义用于实现综合数据管理平台的机上、空中/地面和地面部分之间互操作性的数据通信服务。
- 2) 评价能实现数据通信服务的标准技术, 提出能满足数据管理接口要求的建议。
- 3) 提供实现 OSACBM 通信服务的适当结论。

TATEM OSACBM 实施采用 CORBA/XML 技术, 专门用于满足数据管理平台的接口需求。建议的 TATEM IVHM 体系结构如图 6 所示, 它包括机载系统和地面系统两部分。图 7 显示地面系统的详细结构。

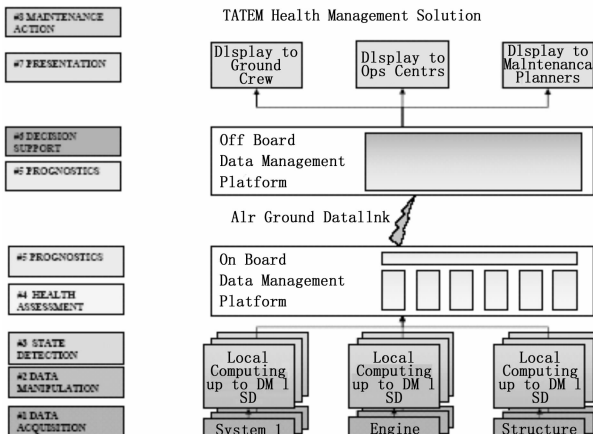


图 6 TATEM IVHM 体系结构

GCS Contribution to the Project Approach

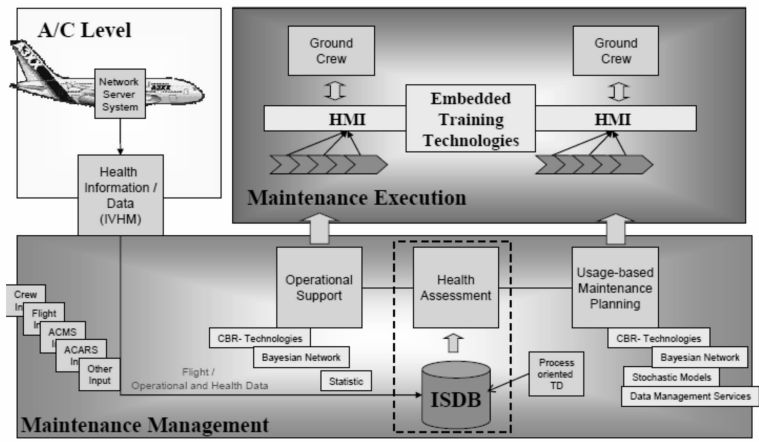


图 7 地面系统的详细结构

2.2 TATEM 计划的组织管理

TATEM 计划历时 4 年, 所需研究经费共 4 000 多万欧元, 其中欧盟框架 6 负责提供 2 210 万欧元, 其余的经费由参与研究的公司提供。GE 负责管理这些资金, 并与来自 12 个国家的近 60 个实体开展合作, 其中的多数伙伴属于制造商, 少数为研究机构和学术机构(这些机构会得到全额资助)。每个参与者都会在该项目中发挥其特长。

TATEM 伙伴将各种研究活动分解成“工作包”, 每个团队负责一个工作包, 具体情况如图 8 所示。

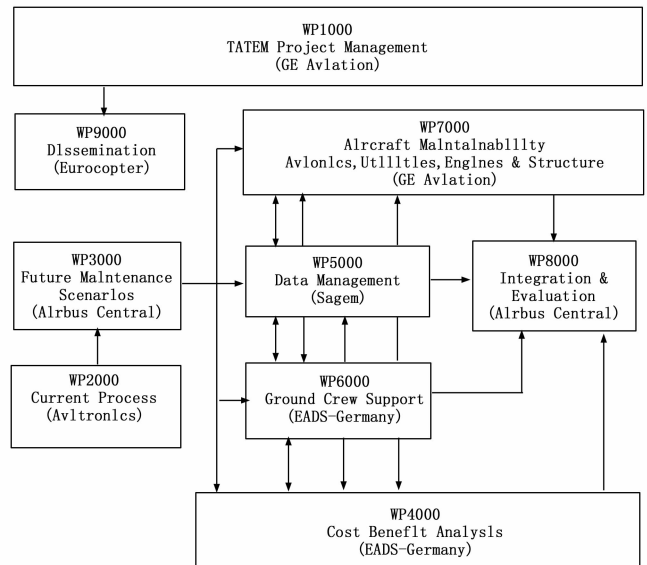


图 8 TATEM 计划的工作包结构

由于工作包 7 000 包含了 TATEM 的较多工作(约 30%), 并覆盖了飞机维修性工作包, 因此, 它又分为 4 个技术分支, 如航电、通用设备、发动机和结构。

3 英国的增强系统与结构适用性的无线技术 (WiNESSS) 项目研究

随着现代科技的飞速发展以及飞机性能的跃升, 未来的飞机及系统需要不断采纳、吸收新技术以满足研制和使用要求。自 2009 年起, 在英国政府的支持下, 由英国航空领域中的一

些精英公司组建了一个合作团队，研发用于飞机的无线传感、数据采集和传输技术，这个项目称为 WiTNESSS 倡议——即“增强系统与结构保养能力的无线技术”（如图 9）^[9]。该项目是英国宇航与防务知识传输网络部（A&DKN）领导制定的国家航空技术战略的一个重要组成部分。

WiTNESSS 主要研究并降低无线数据传输技术的风险，用于航空发动机、直升机和固定翼飞机的测试和健康监测。无线传输意味着需要更少的配线和电缆，从而减轻重量、简化组装。启动该项目的原因之一是目前的飞机仪器和测试系统需要复杂的配线和电缆。这种方式不仅重量重、体积大，而且采集的数据量比较有限。利用无线系统将有助于加速产品研发过程，设计出更轻、更高效的飞机。

3.1 WiTNESSS 的研发重点

WiTNESSS 项目的重点是借助无线方式采集传感器数据、并传输到数据记录装置用于处理，它不局限于某项特定用途，其核心是要搭建一个通用的系统架构，并创建“积木”化模块，供不同的应用选择。这个系统架构可以应用于不同的验证平台，帮助解决直升机、发动机和复合材料的测试和健康监测问题。WiTNESSS 项目的最终目标是实现各个层次的模块化，目前项目团队已经定义了该架构的最上面两层。

从体系建设来看，顶层需求驱动下层结构，因此需要在顶层定义好“该系统应该实现的功能”、“该设计打算实现的功能”，以及“利用采集到的数据所能实现的程度”。从应用需求来看，不同的应用领域可能需要不同类型的传感器和信号调制，数据速率也可能不同。如，一些应用可能需要将数据存储在传感模块中，另一些则可能需要逐层传输数据。因此，该项目团队需要先搭建一个描述该架构功能的结构框图，之后将该框图分解到更详细的设计。从实现效果上看，这些模块都是一个“黑盒子”。以一个 A/D 转化器为例，首先需要知道输入和输出以及控制信号是什么。完成上述定义后，再进入到下一级定义这个“盒子”内部的事情：比如选择一个满足性能要求的芯片，并说明“盒子”里需要的其它零组件。

3.2 WiTNESSS 的未来应用及影响

数据传输对于应用在固定翼飞机、直升机和发动机试验台上的诸多健康监测系统和测试仪器而言至关重要。在这些应用中，利用无线方式传输数据可以带来很多益处，其中包括：显著的费用节省；简化组装（不需要对配线和电缆进行路径规划）；更便利地采集数据等。此外，通过无线数据传输能够极大缩短飞机维修时间，从而在先进的预测和诊断领域发挥重要作用。

具体来讲，WiTNESSS 项目的应用主要分为两类：一类是在研制阶段用于飞机系统和结构测试的仪器；第二类是为获得如应力和振动参数之类的健康监测信息而永久安装在飞机结构中的仪器。在研制过程中，无线数据传输将有助于缩短安装传感器所需要的时间。例如，罗罗公司测试一台新的燃气涡轮发动机时通常要使用 3 000 个热电偶和数百个振动传感器，完成所有这些传感器的连接和布线是一项巨大的工程。如果能使其中一些测量实现无线化，将大大加速这一过程，并缩短产品的面市时间。而在第二类应用中，利用无线数据采集的一个优势是可将传感器安装在以前所不能达的地方，从而获得更全面的健康监测信息，并据此制定按需维修（即基于状态的维

修）计划，有望显著降低维修成本。

3.3 WiTNESSS 发展中遇到的挑战

WiTNESSS 是一个三年的项目，从 2009 年初启动，总预算为 340 万英镑（544 万美元），其中英国政府下属的技术战略局投资了 160 万英镑（256 万美元）。Witnesss 合作团队由 TRW Conekt 公司领导，成员包括奥古斯塔·韦斯特兰公司、空客英国公司、BAE 系统公司、庞巴迪航空公司、GE 航空公司、Qinetiq 公司、QM 系统公司和罗罗公司。这一合作团队涵盖了飞机制造商、技术研发机构和零部件及系统供应商，这种合作形式有利于充分结合各个机构的专业技能，从而为 WiTNESSS 项目带来最大化的工作效率。其中 TRW Conekt 公司的职责是领导要求制定和集成工作，将其它合作伙伴提供的重要数据收集到一起，并将其综合到最终完成的系统中，交付如空客、庞巴迪和奥古斯塔·韦斯特兰公司等终端用户并在其飞机上使用。

另一方面，在严酷的航空环境中实施无线数据传输面临着很大的技术挑战，这些挑战包括电磁干扰、数据安全、数据传输范围以及供电等。以一个安装在机翼一端的无线传感器为例，如何避免供电布线就是其面临的一个问题，项目团队寻求通过自供电方式或开发长寿命电池给这些系统供电。

总的来说，WiTNESSS 项目的最终目标是降低技术风险并将其转化到应用中，它提供的是一种设计方法和一种工作方案。现阶段，该项目只是在各种测试和仪器中应用无线技术，下一步，项目团队打算将无线技术扩展应用到民用航班上。



图 9 WiTNESSS 倡议的无线飞机图片

4 结论及建议

美英等国非常重视 PHM 技术的研发和应用工作，专门制定了多项相关技术计划来统筹 PHM 关键技术的研发、成熟和向应用的转化。这些国家多年的实践表明，制定专项技术计划，统筹规划 PHM 关键技术和工具的开发，构建集成设计与验证环境，循序渐进地推进 PHM 技术成熟和向应用的转化，乃是推动 PHM 技术发展及应用的一条有效途径。吸收借鉴欧美等国发展 PHM 技术的经验教训，并结合国内的实际，对我国发展 PHM 技术提出如下三方面建议：

1) 制订专项计划，统筹规划 PHM 基础研究、技术预研和演示验证工作；

美国 NASA 为了在未来新一代航空运输系统中应用成熟的 PHM/IVHM 技术来提高飞行安全，专门制定了 IVHM 技术预研计划。对 IVHM 技术从基础研究、应用研究及先期技术开发和演示验证工作做了统一规划和部署，并成立了合理的 IVHM 计划管理组对计划的落实进行实时跟踪、监管、改进、

完善。美国国防部在推行增强型基于状态的维修(CBM+)过程中专门组建了企业健康管理工组级综合产品组(EHM WIPT),制定推进PHM技术转化工作的行动计划,加速推进CBM+/PHM使能技术向部队武器平台和能力的成熟转化。

PHM技术的研制和成熟需要一定的周期,为了给型号研制提供有力的支持和保障,确保先进的PHM技术能够与未来新一代型号同期部署,建议国防科技工业主管部门尽快组织制定国防领域PHM专项研究计划,统筹规划对PHM技术的应用基础研究、应用研究和先期技术开发及演示验证工作,以加速其成熟和向外场能力的转化过程。

2) 加强PHM系统基础技术、关键技术和自动化工具的研发:

从欧美等国发展及应用PHM技术的经验可以看出,我国未来新型装备的研制必将应用这项重要技术来确保实现基于状态的维修和自主式保障。因此,为了满足我国未来新装备发展的需要,应组织人力,加强PHM相关基础支撑技术和关键技术的研发工作,包括测试性设计分析和验证与评价技术、先进传感器及嵌入式诊断和预测技术等,并重视自动化支持工具的开发,这些技术和工具是PHM、自主式保障和基于状态的维修的技术基础和物质基础,是提高武器装备战备完好性和持续作战能力、降低使用与保障费用的重要技术保证。

3) 完善测试性标准体系,加强综合诊断和PHM技术相关标准规范研究制定工作:

鉴于标准规范对于指导技术研发、应用方面的重要作用,美军一贯非常重视标准化工作。测试性、综合诊断和PHM涉及的美军用标准和手册有MIL-HDBK-1814《综合诊断》、MIL-STD-1309《测试、测量和诊断设备术语定义》、MIL-HDBK-2165A《系统和设备的测试性大纲》、ISO 13374 OSACBM、DO-178B/DO-254、IEEE Std 1232-2002 AI ESTATE 诊断模型标准、IEEE Std P1598: 测试要求模型(TeRM) 试用标准等几十个,涵盖了术语、规定诊断要求、设计诊断能力、设计评审、分析与评价、验证、信息收集与分析等综合诊断过程的各个方面,成为指导美军装备测试性、综合诊断和PHM工作开展的有效手段。

近年来在研发、应用PHM技术的同时,SAE、IEEE等国际标准化协会也在积极开展PHM技术标准化研究工作,并已取得一些新成果。2012年1月17日,SAE HM-1飞行器综合健康管理(IVHM)委员会发布了一项标准——ARP6883“编写航空航天系统IVHM要求编写指南”,为飞行器PHM技术要求的制定提供指导;2012年4月20日,SAE HM-1 IVHM委员会又发布一项新标准——ARP 6275“IVHM系统的商业案例分析研究”,指导PHM/IVHM技术的应用研究;此外,IEEE可靠性学会正在开展电子系统PHM标准的编制工作。

我国装备测试性基础薄弱,已成为PHM技术进一步在型号中的应用的一个重要障碍。其中的一个重要原因就是缺少完善的测试性标准体系来有效指导规范装备测试性工作。我国在过去十多年中也参照美军标制定了一些与测试性和综合诊断相关的国家军用标准,如GJB 2547《装备测试性大纲》、GJB

3385《测试与诊断术语》等,但远未建立起完善的测试性标准体系,不能满足武器装备开展测试性、综合诊断和PHM工作的需要。

鉴于上述情况,应持续跟踪国外的有关情况,搞清思路,及时掌握国外涉及测试性、综合诊断和PHM的标准的发展情况,开展必要的标准预研工作,不断完善测试性标准体系。建议在新修订的GJB2547A顶层标准的基础上,针对主要的测试性工作项目制订相应的支撑标准。其中,测试性术语已有相关国家军用标准:GJB3385-1998《测试与诊断术语》,需要加以修订;其他支撑标准可包括:《测试性与诊断参数》可以参照IEEE1232标准制定或直接引用;测试性设计分析方面,如可以建立《测试性建模》、《测试性设计准则》标准;测试性验证方面,《测试性试验与评价》标准正在制定中。此外考虑到信息技术和新技术、新方案的需要,建议在充分预研的基础上,适时补充制定综合诊断和PHM标准体系,该体系主要包括综合诊断和PHM工作通用要求、综合诊断和PHM术语、综合诊断和PHM要求确定、综合诊断和PHM设计与分析、综合诊断和PHM试验与评价和信息收集等。应特别重视信息模型标准的建立,考虑引入IEEE1232(测试性信息模型标准)和IEEE1636(维修信息收集和分析的标准接口标准)为我所用等。在上述支撑标准基础上考虑编写适当的工程实用方法或指南,如《测试性设计分析指南》、《测试性验证与评价指南》等。总之,要建立比较合理的测试性标准体系,还需要结合国内型号研制需要和国情,通过开展专门的研究来完善测试性标准体系。

参考文献:

- [1] Ashok N. Srivastava, Robert Mah and Claudia Meyer. Integrated Vehicle Health Management Overview [J]. Aviation Safety 2009 IVHM Presentations, 2009.
- [2] Ashok N. Srivastava, Robert W. Mah. Integrated Vehicle Health Management Technical Plan, Version 2.03 [M]. 2009.
- [3] Dr. Celeste M. Belcastro, Aviation Safety Program Integrated Vehicle Health Management Technical Plan Summary [Z]. NASA, 2008.
- [4] Robert W. Mah, Systems-wide Safety and Assurance Technologies [A]. Fault Management Workshop [C]. New Orleans, 2012.
- [5] Gary W. Hunter, Richard W. Ross, etc. A Concept of Operations For An Integrated Vehicle Health Assurance System. NASA/TM-2013-217825 [R]. 2013.
- [6] Jon Dunsdon. The TATEM Solution [Z]. TATEM Consortium - AeroDays 2006.
- [7] The TATEM Project Supporting Concepts [EB/OL]. <http://www.tatemproject.com/pg14.html>.
- [8] TATEM Project Highlights Aircraft Maintenance Technologies. Jun 19, 2007 [EB/OL]. <http://www.sensorsmag.com/sensors/article/articleDetail.jsp?id=435834>.
- [9] Roger Hazelden. Wireless data gathering and transmission technologies for aerospace applications - the WiTNESSS project [A]. "Advances in wireless sensor networks for hostile environments" [C]. Derby, 2012.