

## ◀ 专家论坛 ▶

飞机健康监测与预测系统的发展及展望<sup>\*</sup>

莫固良, 汪慧云, 李兴旺, 单添敏

(中航工业上海航空测控技术研究所 上海, 201601)

**摘要** 作为新一代飞机所采用的先进维护管理系统, 健康监测与预测系统是一种全面的故障检测、预测与状态管理系统。阐述了健康监测与预测系统的含义, 介绍了健康监测与预测系统的发展过程, 对当前飞机健康监测与预测系统的应用状态进行了全面的概述, 分析了健康监测与预测系统涉及的主要关键技术, 包括先进传感器技术、故障诊断与健康评估技术、故障预测技术、数据融合技术和系统验证与评价技术, 并对未来的发展方向进行了展望。

**关键词** 故障诊断; 状态监测; 健康管理; 故障预测

**中图分类号** TP277; TH16

## 引 言

随着航空装备的不断发展, 飞机性能不断提高, 功能不断完善, 导致飞机系统及其分系统的结构日趋复杂, 安全性问题日益突出, 制造成本不断提高, 武器装备的使用保障费用在其全寿命周期费用中所占比例越来越高, 经济可承受性成为一个不可回避的问题。由于缺少综合的系统诊断和预测能力, 飞机在使用中普遍存在虚警率高、不能复现和重测合格等问题, 导致其故障诊断工时和平均修复时间(MTTR)过长, 测试设备种类繁多, 计划维修次数过多, 从而使飞机使用保障费用高, 维修人力不足, 完好性差, 影响了飞机的安全和再次出动能力。

为有效解决上述问题, 提高飞机可靠性、维修性、安全性和保障性, 降低使用与保障费用, 近十几年来, 欧美发达国家提出了综合诊断方案, 并借助现代信息技术、建模仿真技术、人工智能技术、软件技术、先进传感器技术等最新研究成果, 投入大量人力、物力进行飞机健康监测与预测技术研究, 开发了直升机完好性与使用监测系统(health and usage monitoring system, 简称 HUMS)<sup>[1]</sup>、飞机故障预测和状态管理系统(prognostics and health management system, 简称 PHM)<sup>[2-3]</sup>、中央维护系统(CMS)等先进综合测试、诊断和预测系统, 广泛应用于直升机、固定翼飞机、民用大型飞机等新型飞机上, 使飞机完好性和经济承受性获得显著提高。

## 1 系统含义

根据对象不同, 已开发的健康监测与预测系统主要有 3 种: 针对直升机的完好性与使用监测系统(HUMS); 针对固定翼飞机的飞机故障预测和状态管理系统(PHM); 针对民用大型飞机的中央维护系统(CMS)。

HUMS 是直升机上连续监测涉及飞行安全的关键部件的工作状态并进行故障诊断定位的系统。通过 HUMS 系统对直升机的关键部件(传动系统、机体、发动机、旋翼等)的使用状态及潜在的故障实施监测、报警, 从而提高直升机的飞行安全性、可靠性、维修性和任务出勤率, 实现直升机的状态管理和视情维护。

PHM 是固定翼飞机故障诊断维修保障体系发展趋势的充分体现, 在测试性/BIT、状态检测、余度技术、重构技术等成果基础上, 通过自动和人工测试、BIT/测试性和维修辅助手段等诊断要素的综合, 开展测试、综合诊断和故障预测管理的综合设计。通过 PHM 使传统的基于传感器的诊断转向基于智能系统的预测, 从而实现固定翼飞机的智能化和综合化诊断。

CMS 是大型飞机建立在先进的机载数据采集、通信设备、空地数据通信网络、计算机与计算机网络技术上的全新的民用飞机综合状态监控、故障诊断与维修辅助系统。中央维护系统是测试及诊断技术发

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-07-29; 修改稿收到日期: 2013-09-23

展的产物,是飞机系统由外部测试到机内测试的产物。对于民用大型飞机,中央维护系统设计研究是一项总体性的顶层设计工作,涉及面广,系统维护的对象覆盖飞机航空电子系统、机电系统以及飞机结构。

## 2 发展过程

20 世纪 70—80 年代,随着飞机设计及机上设备越来越复杂,出现了使用和保障费用高、完好性差等问题,逐渐引起各国航空界的普遍注意,于是提出了飞机“健康”的概念。由于飞机传动部件多,且结构及飞行环境复杂,使飞机飞行安全保障和日常使用维修问题尤为突出;因此,针对飞机的使用安全和维护保障,欧美等一些飞机技术先进的国家投入大量财力、物力和人力,研制机载状态监测和故障诊断系统。

英国在 20 世纪 70 年代初期,由 PL 航空电子公司和 Bristow 直升机公司在英国军方支持下研制了具有监测、诊断、预示、报警、记录和维护指导等多种功能的直升机完好性与使用监测系统(HUMS)。鉴于 CAA/FAA 关于直升机安装座舱语音和飞行数据记录(CVFDR)的强制性要求,GEC-PL 公司将 CVFDR 功能综合到 HUMS 系统,即 IHUMS,并于 1991 年在西科斯基公司的 S-61 直升机上取得了 FAA 适航证。

20 世纪 90 年代初,随着高速微处理机技术、信号处理技术和系统集成技术的发展,HUMS 系统的处理能力越来越强,监测功能进一步得到完善。英国 Smiths Industries 公司和法国宇航公司先后研制了通用 HUMS 系统——GenHUMS(见图 1)和 UHUMS(为“黑鹰”直升机研制),以满足不断增长的 HUMS 功能需求。在上述系统中,语音与飞行数据记录部分不再是一个单独的部件,而以加固模块的形式置于数据采集与处理单元内。其中,UHUMS 由于追求通用性,使该系统结构尤其是接口比较复杂,价格较高。

20 世纪 90 年代中期以来,为适应不同吨位直升机使用要求,系统功能可按需求扩展或剪裁,易于系统维护,同时进一步将功能从监测扩展到管理。英国 Bristow 公司与 Smiths Industries 公司共同开发了模块化的 HUMS,即 MHUMS。这样用户可以根据需要配置功能模块,其成本也显著降低,约为 IHUMS 的二分之一,在“海豚”、NH90 和 EH101 直升机上得到广泛应用。

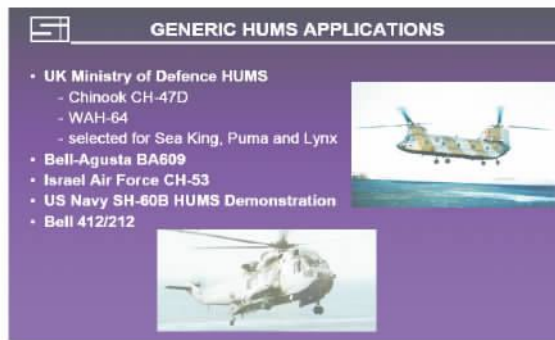


图1 Smiths 公司的 GenHUMS

法国欧直公司为自主研制的直升机开发了 EUROHUMS,发展历程如图 2 所示,目前已发展到 M'ARMS,在 EC 系列上广泛运用。

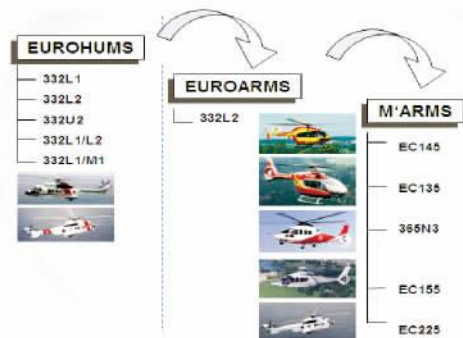


图2 欧直公司 HUMS 系统的发展

美国在 20 世纪 80 年代就开始发展健康监测与预测技术,要求对系统故障可预测,并具有对系统健康状况进行管理的能力。该技术首先在陆军直升机上得到应用,并逐步发展成使用 and 状态管理系统。航天领域提出了航天器集成健康管理概念。随着故障监测和维修技术的迅速发展,各军种和国防部开展了综合状态评估(integrated condition assessment,简称 ICA)、诊断改进计划(army diagnosis improvement plan,简称 ADIP)、可重复使用运载器的飞行器综合健康管理(integrated vehicle health management,简称 IVHM)<sup>[4]</sup> 技术的研究,先后开发了飞机状态监测系统(aircraft condition monitoring system,简称 ACMS)、发动机监测系统(engine monitoring system,简称 EMS)、综合诊断预测系统(integrated diagnostics and prognostics system,简称 IDPS)、综合状态评估系统(integrated condition assessment system,简称 ICAS)等<sup>[5-9]</sup>。同时,在发动机和结构件健康监控、齿轮箱和液压系统健康监测等具体领域的技术方面都得到了发展。

健康监测与预测技术在航空领域的成熟应用始

于 20 世纪 80 年代后期至 90 年代。阵风战斗机、B-2 轰炸机、“全球鹰”无人机、“鹰”教练机、C-130“大力神”运输机和美国海军 P-8A 多任务海上飞机等均装备了初级的健康监测与预测系统。直升机方面,美军海军陆战队在 CH-53E“超级种马”和 MH-53E“海龙”直升机机群中使用了 IMD(Integrated mechanical diagnostics)-HUMS。在陆军直升机上,已有上千架安装了 HUMS 系统,包括 AH-64 阿帕奇、UH-60 黑鹰和 CH-47 支奴干等主战机型。在伊拉克战争中,装备了 IMD-HUMS(见图 3)的直升机以良好的维修性和使用安全性为美国带来了巨大的军事成果和经济效益。



图 3 UH-60 直升机上的 IMD-HUMS

20 世纪 90 年代末,随着新一代飞机的发展,如美国空军先进战术战斗机 F-22A“猛禽”、F-35“联合攻击战斗机”等,对飞机测试、维修和保障提出了新要求,在飞机研发中,均设立了 PHM 项目,进行 PHM 系统的研制<sup>[10-11]</sup>。图 4 所示为 F-35 中 PHM 的系统结构。目前,固定翼飞机中均安装了 PHM 系统,满足其作战任务、性能和保障要求。

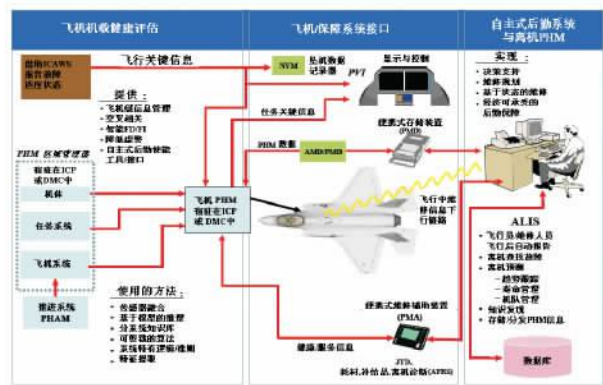


图 4 F-35 中 PHM 的系统结构

除了在军事领域的成功应用外,健康监测与预测技术还在民用飞机领域获得广泛应用,成为名副

其实的军民两用技术。波音公司已将 PHM 技术应用到民用航空领域,称作飞机状态管理系统 (aircraft health management, 简称 AHM)。其中,在法国航空公司、美利坚航空公司、日本航空公司和新加坡航空公司的 B777, B747-400 等飞机上已开始大量装备。据波音的初步估计,通过使用 AHM 可使航空公司节省约 25% 因航班延误及取消而导致的费用。此外, AHM 通过帮助航空公司识别重复出现的故障和发展趋势,有力支持了机队“长期可靠性计划”的实现。航空无线电通信公司与 NASA 兰利研究中心研制了飞机状态分析与管理 (ACAMS), 其成功地在 NASA 的 B757 飞机上进行了飞行演示验证。

西方发达国家经过几十年的研究,已将飞机健康监测与预测技术广泛应用在军民飞机领域。在新一代飞机的设计、生产和使用中,广泛采用智能化健康监测与预测技术,将传统的飞机落地维修发展为空中诊断、预测、预报、地面远程诊断、地面准备和飞机着陆后快速修复<sup>[12]</sup>, 实现诊断、维修、后勤保障一体化设计,对提高航空器的安全性、减少寿命周期成本起到了关键作用<sup>[13]</sup>。

### 3 系统的应用

目前,健康监测与预测技术已广泛应用于英国、美国、加拿大、荷兰、新加坡、南非、以色列等国的直升机上。

美陆军直升机安装 HUMS 系统,使直升机任务成功率提高了 10%。已经安装了 180 多架,包括 AH-64 阿帕奇、UH-60 黑鹰和 CH-47 支奴干,并批准全部的 750 架“阿帕奇”安装 HUMS 系统。Smiths 公司自 1991 年起共有 400 套 HUMS 在各类直升机上应用,飞行时间已达 200 万小时。英国国防部也与史密斯航宇公司达成协议,为 70 架未来山猫直升机开发一种状态与使用监测系统和机舱声音与飞行数据记录仪 (HUMS/CVFDR), 已于 2011 年开始交付。另外,史密斯航宇公司也将为韩国直升机项目 (KHP) 提供价值超过 2 000 万美元的直升机 HUMS 系统。图 5 所示为应用了 HUMS 系统的直升机。

健康监测与预测技术不但应用于直升机上,在固定翼飞机上也开始应用。例如,阵风战斗机、B-2 轰炸机、“全球鹰”无人机、“鹰”教练机和 C-130“大力神”运输机上采用了各种类似的健康管理系统,美国陆军的 RQ-7A/B“影子”200 战术无人机系统也



将装备 HUMS 类似系统。

PHM 系统目前主要应用在美国先进战术战斗机 F-22A“猛禽”、F-35“联合攻击战斗机”、欧洲战斗机 EF-2000“台风”和法国多用途超音速战斗机“阵风”等。图 6 所示为一些应用了 PHM 系统的固定翼飞机。



图 5 应用 HUMS 系统的直升机



图 6 应用 PHM 系统的固定翼机

## 4 关键技术

健康监测与预测系统的任务包括连续监控设备的使用、健康和安全性情况,监测部件或分系统的性能降级状况,然后隔离故障,预计失效时间,并计划需要完成的维修工作。上述过程的成功取决于多种关键技术,包括先进传感技术、故障诊断与健康评估技术、故障预测技术、数据融合技术、系统验证与评价技术。

### 4.1 先进传感器技术

传感器与数据采集策略是健康监测与预测领域中的基础要素。传感器是健康监测系统与监测对象直接发生联系的器件或装置,其作用是感受被测参量的变化并按一定规律将其转换成一个相应的便于传递的输出信号。传感器种类、数量、尺寸、重量、动态特性和安装位置的选择等都会影响传感器采集的数据,并最终影响诊断及预测算法的可靠度。飞机的特点要求所选择的传感器应具备重量轻、体积小、抗毁、抗干扰、工作温度范围大、低功耗、高性能和环境适应性强等特点<sup>[14]</sup>,传感器应布置在最能反映飞行器相应参数变化的点上,以便准确感知飞机的状态参数变化,并通过优化配置提高传感器的系统效能,降低传感器的成本。

### 4.2 故障诊断与健康评估技术

故障诊断与健康评估技术涉及多门学科,如现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别和人工智能等。其任务是监测飞机运行状态,判断其是否正常;诊断系统出现的故障,确定故障部位,并分析故障对系统的影响,判断系统能否继续运行。故障诊断与健康评估主要包含以下内容。

1) 状态监测。状态监测的任务是了解掌握飞机的运行状态,包括采用各种检测、测量、监视、分析和判别方法,结合飞机的历史和现状,考虑环境因素,对运行状态进行评估,判断其处于正常或非正常状态,并对状态进行显示和记录,对异常状态做出报警,以便及时加以处理,并为故障分析、性能评估、合理使用和安全生产工作提供信息和准备基础数据。

2) 健康评估。为实现设备的主动维护,必须充分了解和把握设备性能与健康退化趋势,实时掌握设备的健康状态信息。设备在使用过程中可分为 4 个状态:正常状态、健康退化状态、危险状态和故障(失效)状态。因此,若能在设备运行中检测或测量到能指示设备性能与健康退化的状态指标,就可以有针对性地组织设备维修,防止设备异常失效的发生。

3) 故障诊断。故障诊断的任务是根据传感器数据、状态监测信息和健康评估结果,结合已知结构特性和参数、运行工况和环境条件、运行历史(运行记录和曾发生过的故障及维修记录等),对可能要发生或已发生的故障进行分析判断,确定故障性质、类别、程度、原因和部位,指出故障发生发展的趋势及其后果。

### 4.3 故障预测技术

故障预测旨在预先诊断部件或系统完成其功能的健康状态,确定部件或系统将正常工作的时间长度。如图 7 所示,设备或者系统从健康到故障再到失效是一个过程,而故障状态也分轻微故障与严重故障等。当监测点在图 7 的 C 点,故障预测就是对 D 点和 E 点等的到达时间进行预测,并给出相应的置信区间。

故障预测的研究对象是未来的不确定性事件。预测的不确定性是基于状态的维修(condition-based maintenance,简称 CBM)和故障预测与健康管理技术(PHM)的致命弱点,也给 CBM/PHM 系统的设计者带来了巨大的挑战。此外,精准的预测

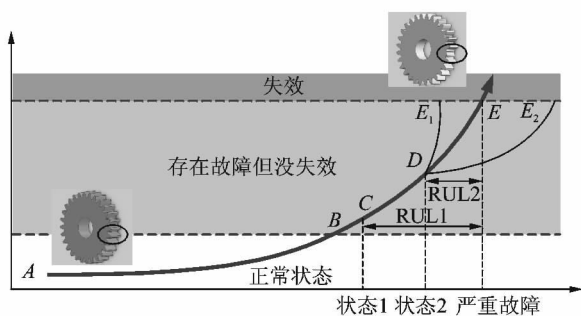


图 7 故障趋势与失效预报

模型需要准确的故障演化规律以及足够多的失效数据样本来支持训练、验证和微调预测方法。

#### 4.4 数据融合技术

为提高状态监测、健康评估和故障预测的准确性,并能确定推理结果的置信度,可以利用数据融合技术。数据融合是指通过协作或竞争的过程来获得更准确的推论结果。常用数据融合算法有贝叶斯推论、D-S 证据理论、模糊逻辑推论和神经网络等<sup>[15]</sup>。在 PHM 系统中一般有如下 3 个层次的数据融合:

- 1) 较低层次的数据融合将多传感器的数据进行融合,以进行信号识别和特征提取;
- 2) 较高层次的信息融合将提取的特征进行进一步融合,获得故障诊断所需信息;
- 3) 最高层次的知识/决策融合将基于经验的信息,如历史故障率、物理模型的预计结果,同基于信

号的信息进行融合,通常用于系统级的预测推理和进行维修决策。

#### 4.5 系统验证与评价技术

验证是指为检验研制产品是否满足合同规定的某方面要求而进行的工作。通过验证可以发现设计中存在的缺陷,为产品设计提供信息,以便采取改进措施。健康监测与预测系统验证的最终目标是评价健康监测与预测的能力是否满足规定的要求。在研制过程中尽早开展健康监测与预测系统验证,可以更早地发现健康监测与预测系统的设计缺陷,为提高健康监测与预测技术的设计水平提供改进依据,确保健康监测与预测技术的设计要求得到全面落实。目前,PHM 系统验证方法主要分为基于分析评估的方法、基于仿真的方法和基于试验的方法<sup>[16]</sup>。系统评价则主要通过建立相应的指标体系来实现。

### 5 技术展望

健康监测与预测包含状态监控、故障诊断、故障预测和综合集成等部分。当前,健康监测与预测技术的发展趋势是以系统集成应用为牵引,提高诊断与预测精度,扩展健康监控应用对象范围,目的是支持基于状态的维修(CBM)与自主式保障,如表 1 所示。

表 1 健康监测与预测技术的发展趋势

发展方向	发展趋势
系统集成应用方面	a. 如何采用并行工程原理,与被监控产品设计同步,进行 PHM 的框架与细节设计; b. 如何进行健康监测与预测系统的定量性能评价与验证; c. 针对故障预测的不确定性,如何进行风险-收益分析,实现容忍不确定性的保障决策
提高诊断预测精度及挖掘健康演化规律方面	a. 研究混合及智能数据融合技术,加强经验数据与故障注入数据的积累,提高诊断与预测置信度; b. 挖掘系统健康演化规律的途径; c. 不断寻求高信噪比的健康监控途径; d. 研究灵巧、健壮的先进传感器和传感器布局优化问题,提高数据源阶段的精度
扩展应用对象范围方面	a. 向电子产品故障预测的扩展; b. 如何与故障预测技术相结合,提升 BIT 能力,减少 CND,降低虚警率; c. 如何实现寿命消耗监控(LCM)不确定性的定量评价; d. 如何把 LCM 与故障征兆(precursor)技术相结合,提高 LCM 的置信度等

### 6 结束语

虽然健康监测与预测系统已逐步开始得到应用,但距离工程实用还有一定的差距。目前,仅能覆

盖部分关键系统和部件,并且对已覆盖的系统和部件中的一些故障机理的研究还不够透彻,只能实现故障诊断,而不具备预测的能力。此外,如何正确有效地评估系统的健康状态,并做出优化的维修决策等都需要进行大量的进一步的研究工作。

## 参 考 文 献

- [1] Dickson B, Cronkhite J, Bielefeld S, et al. Feasibility study of a rotorcraft health and usage monitoring system (HUMS): usage and structural life monitoring evaluation; phase 2[R]. For Worth, Texas, USA: Bell Helicopter Textron Inc Fort Worth tx, 1996.
- [2] Hess A, Calvellido G, Dabney T. PHM a key enabler for the JSF autonomic logistics support concept[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2004:3543-3550.
- [3] 曾声奎, Michael G P, 吴际. 故障预测与健康管理的现状与发展[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626-632.  
Zeng Shengkui, Michael G P, Wu Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies[J]. ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626-632. (in Chinese)
- [4] Derriso M, Pratt D M, Homan D B, et al. Integrated vehicle health management: the key to future aerospace systems[C]// Proceedings of the Fourth International Workshop on Structural Health Monitoring. Pennsylvania, USA: DEStech Publications Inc., 2003: 3-11.
- [5] Tumer I Y, Bajwa A. A survey of aircraft engine health monitoring systems[C]// Proceedings of the 35<sup>th</sup> Joint Propulsion Conference. Los Angeles, USA: AIAA, 1999.
- [6] Roemer M J, Kacprzynski G J. Advanced diagnostics and prognostics for gas turbine engine risk assessment [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2000: 345-353.
- [7] Nickerson B, Lally R. Development of a smart wireless networkable sensor for aircraft engine health management[C]// Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2001: 3255-3262.
- [8] Zhang G, Lee S, Propes N, et al. A novel architecture for an integrated fault diagnostic/prognostic system [C]// AAAI Symposium. Stanford, California: The Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 2002.
- [9] Murphy B P. Machinery monitoring technology design methodology for determining the information and sensors required for reduced manning of ships [R]. Monterey, California, USA: Massachusetts Inst of Tech Cambridge, 2000.
- [10] Hess A, Fila L. The joint strike fighter (JSF) PHM concept: potential impact on aging aircraft problems [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2002: 3021-3026.
- [11] 张宝珍, 曾天翔. PHM: 实现 F-35 经济可承受性目标的关键使能技术[J]. 航空维修与工程, 2005, 17(6): 20-23.  
Zhang Baozhen, Zen Tianxiang. PHM: the key enabler to F-35's affordability[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2005, 17(6): 20-23. (in Chinese)
- [12] Byington C S, Roemer M J, Galie T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2002: 2815-2824.
- [13] 姜兴旺, 景博, 张劼, 等. 综合飞行器故障预测与健康管理系统研究[J]. 航空维修与工程, 2008(5): 37-40.  
Jiang Xingwang, Jing Bo, Zhang Jie, et al. Integrated vehicle prognostic and health management system[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2008(5): 37-40. (in Chinese)
- [14] 熊泽涛, 邱雷, 刘彬. 飞机结构 PHM 及其关键技术[J]. 测控技术, 2012, 31: 198-201.  
Xiong Zetao, Qiu Lei, Liu Bin. The prognostic and health management of aircraft structure and its key technologies[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31: 198-201. (in Chinese)
- [15] Scandura Jr P A. Integrated vehicle health management as a system engineering discipline[C]// Digital Avionics Systems Conference. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2005: 10-14.
- [16] 杨洲, 景博, 张劼, 等. 机载系统故障预测与健康管理的验证与评估方法[J]. 测控技术, 2012, 31(3): 101-104.  
Yang Zhou, Jing Bo, Zhang Jie, et al. Verification and evaluation method of airborne PHM system[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(3): 101-104. (in Chinese)



**第一作者简介:**莫固良,男,1955年5月生,研究员。主要研究方向为故障诊断与健康管理的验证与评估方法。曾发表《采用设备故障诊断技术,为航空工业服务》(《第十届全国设备监测与诊断学术会议论文集》2000年)等论文。

E-mail: pcbsh@citiz.net

## Health Monitoring and Prognostics System for Aircraft

*Mo Guliang, Wang Huiyun, Li Xingwang, Shan Tianmin*

(AVIC Shanghai Aero Measurement-Controlling Research Institute Shanghai, 201601, China)

**Abstract** As an advanced maintenance management system of new generation aircraft, a health monitoring and prediction system is a comprehensive fault detection, prediction and state management system. The meaning and development of this system are described, and its applications is also summarized. The key technologies of this system involve advanced sensors, fault diagnosis and health assessment, failure prediction, data fusion and system verification and evaluation. Finally, the future directions in its development are discussed.

**Keywords** fault diagnosis, condition monitoring, health management, fault prognostic

## Influence of Axial Milling Force and Gyroscopic Effect on Milling Chatter Stability

*Wu Shi, Qu Da, Liu Xianli, Xiao Fei*

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology Harbin, 150080, China)

**Abstract** Firstly, the influences of alternating axial milling force and gyroscopic effect on the natural frequency of ball-end mill shank is analyzed. Secondly, based on the full-discrete method, that influences on chatter stability lobes of ball-end mill is also studied. Finally, the experimental results verified that the model can accurately predict the milling chatter stability lobes. With the increase of alternating axial milling force and gyroscopic effect, the steady critical cutting depth of milling system shows a downward trend. But it is a nonlinear relationship, because there would be local augmentation of steady-state critical cutting depth, and the gyroscopic effect only influences the system stable region of the high-speed part, not on the low-speed one.

**Keywords** chatter stability, axial force, gyroscopic effect, full-discrete method

## Resonance Suppression Method Based on $H_\infty$ Mix Sensitivity of CMG Gimbal System

*Han Bangcheng<sup>1,2</sup>, Yang Lianhui<sup>1,2</sup>, Li Haitao<sup>1,2</sup>*

(1. Science and Technology on Inertial Laboratory, Beijing University of Aeronautics  
and Astronautics Beijing, 100191, China)

(2. Fundamental Science on Novel Inertial Instrument and Navigation System Technology Laboratory Beijing, 100191, China)

**Abstract** Aiming at the issue of mechanical resonance of the control moment gyro (CMG) gimbal system caused by the harmonic drive due to its flexibility and low damping characteristics, a vibration suppression method based on  $H_\infty$  mix sensitivity is presented. According to the dynamic model of gimbal system, the theoretical analysis of mechanical resonance is achieved and the resonance frequency point of gimbal system is described. At the same time, regarding of the torsion torque introduced by the harmonic drive as a load torque disturbance, a  $H_\infty$  mix sen-