



# 复杂装备

## 故障预测与健康管理技术及应用

◎ 马飒飒 赵守伟 陈国顺 张 岩 编著

FUZAZHUANGBEI GUZHANGYUCE YU  
JIANKANG GUANLI JISHU JI  
YINGYONG

河北科学技术出版社



马飒飒 (1971.10-), 女, 河北深州人, 博士, 硕士研究生导师, 总装备部军械技术研究所 电子与无人机技术保障研究室高级工程师, 主要从事电子装备故障诊断、PHM 等方面理论与技术研究, 获军队科技进步奖 8 项, 以第一作者发表学术论文 50 余篇。



# 复杂装备

## 故障预测与健康管理技术及应用

◎ 马飒飒 赵守伟 陈国顺 张 岩 编著

FUZAZHUANGBEI GUZHANGYUCE YU  
JIANKANG GUANLI JISHU JI  
YINGYONG

河北科学技术出版社

## 编委会

主 任 陈国顺

编 著 马飒飒 赵守伟 陈国顺 张 岩 赵 洋  
王格芳 夏明飞 牛 刚 吕艳梅 张 东

### 图书在版编目 ( C I P ) 数据

复杂装备故障预测与健康管理技术及应用 / 马飒飒  
等编著. —石家庄: 河北科学技术出版社, 2012. 5  
ISBN 978 - 7 - 5375 - 5154 - 0

I. ①复… II. ①马… III. ①航天器发射场—故障诊  
断系统—设备管理 IV. ①V55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 042870 号

### 复杂装备故障预测与健康管理技术及应用

马飒飒 赵守伟 陈国顺 张 岩 编著

---

出版发行 河北科学技术出版社  
地 址 石家庄市友谊北大街 330 号 (邮编: 050061)  
印 刷 石家庄燕赵创新印刷有限公司  
经 销 新华书店  
开 本 787 × 1092 1/16  
印 张 13.5  
字 数 312 000  
版 次 2012 年 5 月第 1 版  
2012 年 5 月第 1 次印刷  
定 价 25.00 元

---

# 前 言

随着信息技术、智能技术等各种高新技术的发展及其在武器装备中的广泛应用，武器装备系统越来越复杂，自动化程度越来越高，作战功能和性能日趋综合化和系列化。与此同时，随着武器装备作战性能和作战能力的提升，对复杂武器装备系统的可靠性、维修性、保障性的要求越来越高。如何处理好装备在役期间故障与完好性的问题也日渐突出。并且，复杂武器装备系统的故障呈现出许多不同特点，使得部队相应的维修保障任务越来越繁重。

复杂装备是军队战斗力的重要组成部分，在国防建设中发挥着重要作用，一旦主要装备发生故障或健康状态劣化，平时影响部队的训练、执勤，甚至直接影响部队是否能够随时执行应急作战任务，战时则影响部队战斗力的发挥。因此，为了减少装备故障引发的严重的安全性和可靠性后果，缩短停机时间，降低维修费用，提高部队战斗力，复杂武器装备系统的“健康”问题越来越引起我军的关注。

目前，为了预防装备故障发生或防止装备健康状态进一步劣化，定期维修是应用最普遍的一种预防性维修。定期维修适用于已知寿命分布规律且确有耗损期的装备或部件，这种维修方式在一定程度上预防了故障的发生，便于安排维修工作和组织备件的存储与供应，但它不能充分利用装备的寿命，容易产生维修不足和维修过剩等情况。研究表明：大多数装备的运行寿命与其发生故障可能性之间的相关性越来越少，传统的定期维修方法已不能满足对装备实施精确维修的需求。

针对这些情况，作为适应 21 世纪高技术战争的自主后勤保障系统的重

要基础，故障预测与健康管理（PHM）系统正在引起越来越多的重视。PHM 的两个主要功能是故障预测与健康状态管理。故障预测功能可预测故障发生时间与部位，并确定设备剩余寿命，在发生灾难性事故之前能够及时预知，并采取必要的维修预防措施；健康状态管理则是根据诊断/预测信息、可用维修资源和使用需求对维修活动做出适当决策。PHM 可进一步将具有潜在故障的部件的相关信息进行选择报告、辅助决策和设备信息管理，以综合状态评估与维修资源管理功能，提高维修保障的信息化、自动化程度，降低风险，从而提高武器装备的作战能力。PHM 将事后维修、定期维修转变为事前、预防性、主动维修，在掌握部件失效机理的情况下，构建部件失效模型，探测潜在故障，实施维修保障。大量 PHM 技术应用于国防、航空和民用领域，研究资料表明：PHM 可显著降低维修、使用和维护保障费用，提高复杂装备的可靠性和战斗力。PHM 关键技术的研究对我军维修保障向着信息化、智能化、数字化方向发展具有深远的影响。

装备故障预测与健康状态管理是涉及状态监控、故障诊断与预测、健康状态评估、寿命预测与维修决策支持、规划及控制的综合学科。装备健康管理不仅关注装备及其部件的技术状态，而且还关注环境因素、使用因素等对装备健康状态的影响。在状态监控、故障预测基础上的装备综合健康管理是机内测试和状态监测能力的拓展，是从装备级状态监测与故障诊断到系统级综合诊断与状态管理的转变。对关键装备进行状态监测与健康状态管理可提高装备维修管理水平，建立信息化、智能化的维修管理机制。

装备故障预测与健康状态管理技术应用于不同装备领域，则根据装备自身特点，开发不同的“故障预测与健康状态管理”应用平台，从而延伸出不同类型的 PHM 系统。

本书以试验技术研究项目——“航天发射场测发系统关键设备健康管理技术研究”研究课题为背景，对以航天发射场测发地面设备为典型代表的复杂装备故障预测与健康状态管理系统的关键技术进行研究，期望达到提高装备任务成功率，降低维修保障费用，缩短维修任务周期等目标，以应对复杂装备

日益频繁的作战任务对维修时间紧、维修任务重、装备可靠性要求高等方面提出的苛刻要求。

同时本书将装备故障预测与健康状态管理技术应用于无人机系统领域，根据无人机本身所具备的特点而被拓展为无人机安全监控、故障预警的综合健康管理系统。因此，为了解决无人机系统维修模式单一、故障诊断与预测技术手段相对落后、维修管理信息化程度较低等问题，为实现其维修管理向着规范化、信息化、智能化方向发展提供理论与技术依据，非常有必要结合先进的无人机健康管理理论，以无人机系统中的关键部件为研究对象和突破口，对无人机安全监控、故障预测与健康管理技术进行系统研究。

由于时间和水平的制约，书中不足之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

编 者

2012年2月

# 目 录

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| 第一章 概述 .....                      | ( 1 )  |
| 第一节 PHM 概述 .....                  | ( 1 )  |
| 第二节 国内外研究应用现状与存在的问题 .....         | ( 9 )  |
| 第二章 装备 PHM 方案分析 .....             | ( 14 ) |
| 第一节 PHM 方案概述 .....                | ( 14 ) |
| 第二节 基于 RCM 分析的装备 PHM 方案 .....     | ( 14 ) |
| 第三节 小结 .....                      | ( 18 ) |
| 第三章 状态监测与数据处理技术 .....             | ( 19 ) |
| 第一节 概述 .....                      | ( 19 ) |
| 第二节 先进智能传感器技术 .....               | ( 20 ) |
| 第三节 高速数据采集与传输技术 .....             | ( 24 ) |
| 第四节 数据预处理技术 .....                 | ( 27 ) |
| 第五节 现场监测单元设计示例 .....              | ( 34 ) |
| 第六节 小结 .....                      | ( 40 ) |
| 第四章 健康状态评估与故障预测技术 .....           | ( 41 ) |
| 第一节 概述 .....                      | ( 41 ) |
| 第二节 健康状态评估技术 .....                | ( 41 ) |
| 第三节 故障预测技术 .....                  | ( 48 ) |
| 第四节 综合诊断技术 .....                  | ( 54 ) |
| 第五节 小结 .....                      | ( 61 ) |
| 第五章 剩余寿命预测与维修决策技术 .....           | ( 62 ) |
| 第一节 概述 .....                      | ( 62 ) |
| 第二节 常用的剩余寿命预测模型与维修决策模型 .....      | ( 62 ) |
| 第三节 基于状态信息的剩余寿命预测模型 .....         | ( 65 ) |
| 第四节 设备维修决策优化模型 .....              | ( 69 ) |
| 第五节 混联系统基于费用最优和可靠性约束的维修周期优化 ..... | ( 70 ) |
| 第六节 小结 .....                      | ( 76 ) |
| 第六章 装备健康管理信息系统 (HMIS) 设计 .....    | ( 78 ) |



|             |                           |              |
|-------------|---------------------------|--------------|
| 第一节         | 系统定位及要求                   | (78)         |
| 第二节         | 系统结构                      | (79)         |
| 第三节         | 系统设计                      | (81)         |
| 第四节         | 小结                        | (89)         |
| <b>第七章</b>  | <b>装备健康管理系统的设计与实现</b>     | <b>(90)</b>  |
| 第一节         | 概述                        | (90)         |
| 第二节         | 系统结构框架分析与设计               | (91)         |
| 第三节         | 系统主要功能模块设计与实现             | (95)         |
| 第四节         | 系统数据库分析与设计                | (100)        |
| 第五节         | 装备健康管理原型系统的实现技术           | (102)        |
| 第六节         | 小结                        | (106)        |
| <b>第八章</b>  | <b>航天发射场摆杆系统设备健康管理应用</b>  | <b>(107)</b> |
| 第一节         | 航天发射场测发系统设备健康管理流程         | (107)        |
| 第二节         | 航天发射场测发系统设备维修管理现状         | (109)        |
| 第三节         | 摆杆系统设备健康管理分析              | (110)        |
| 第四节         | 摆杆系统设备健康信息感知              | (112)        |
| 第五节         | 摆杆系统设备健康管理的关键环节           | (119)        |
| 第六节         | 摆杆系统设备健康管理的主要措施           | (127)        |
| 第七节         | 小结                        | (135)        |
| <b>第九章</b>  | <b>无人机系统安全监控与健康管理关键技术</b> | <b>(136)</b> |
| 第一节         | 无人机健康管理分析技术               | (137)        |
| 第二节         | 无人机状态信息获取技术               | (145)        |
| 第三节         | 无人机状态监控技术                 | (152)        |
| 第四节         | 无人机健康状态评估与故障预测技术          | (157)        |
| 第五节         | 无人机剩余寿命预测技术               | (168)        |
| 第六节         | 无人机装备维修决策技术               | (172)        |
| 第七节         | 无人机维修资源优化技术               | (178)        |
| 第八节         | 全员全程健康管理技术                | (185)        |
| 第九节         | 小结                        | (189)        |
| <b>第十章</b>  | <b>发展及展望</b>              | <b>(191)</b> |
| 第一节         | PHM 技术发展趋势                | (191)        |
| 第二节         | PHM 技术发展目标                | (194)        |
| <b>附表 1</b> | <b>摆杆系统 FMEA 分析表</b>      | <b>(197)</b> |
| <b>附表 2</b> | <b>摆杆系统扩展 FMEA 分析表</b>    | <b>(199)</b> |
| <b>附表 3</b> | <b>发动机系统主要故障记录表</b>       | <b>(201)</b> |
| <b>参考文献</b> |                           | <b>(203)</b> |

# 第一章 概述

随着各种大型复杂武器系统性能的不断提高及系统组成的复杂性不断增加，各种信息技术、智能技术被广泛应用其中，使复杂装备的可靠性、维修性、故障预测与诊断及维修保障等问题日渐突出。目前，对大型武器系统的维护仍然以定期维护、预防性维修为主，采用多、勤、细来保障系统可靠性及正常任务的完成。传统的维修保障模式是以耗费大量人力、物力与财力为代价的，并且效率低下。随着复杂装备执行任务的日益增多，新的基于状态的视情维修（Condition Based Maintenance, CBM）开始得到研究与运用，其后勤保障规模小、效率高、预知性好等优势开始显露头角，也就推动了以 CBM 为基础的故障预测与健康管理（Prognostic and Health Management, PHM）的研究与发展。

## 第一节 PHM 概述

### 一、基本概念

提出 PHM 基本概念之前，首先必须明确一些相关基本概念：

以可靠性为中心的维修（RCM）是目前国际上通用的用以确定装备预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程过程，也是制订维修大纲的规定方法。RCM 可定义为：按照以最少的资源消耗保持装备固有可靠性和安全性的原则，应用逻辑决断的方法确定装备预防性维修要求的过程或方法。RCM 是确定装备预防性维修需求的一种系统的维修分析手段或方法。RCM 主要根据产品概况、产品故障信息、产品维修保障信息、费用信息等，确定重要功能产品，进行故障模式及影响分析（FMEA），明确产品功能、故障模式、故障原因和故障影响，建立 RCM 逻辑决断图以选择维修类型，确定维修计划。

随着基于传感器技术、状态检测技术和故障诊断技术的状态维修（Condition Based Maintenance, CBM）理论与技术的迅速发展，CBM 逐渐成为维修人员熟悉的术语。在很多文献中，CBM 也被称作基于状态的维修、状态维修、状态监测（控）维修、计划性预测维修、视情维修等。视情维修（Condition Based Maintenance, CBM）定义为：通过测量设备的工作状态，构建一套设备维修的策略，以预计设备在未来是否会工作异常。如果运行中出现异常，通过检测设备的性能或人工传感器，采用条件监控和统计处理控制技术，可以监测设备的工作状态，以给出相应的措施来避免异常工况带来严重后果

果。并在设备状态监测的基础上，根据监测和分析诊断的结果安排维修时间和方式。

为了确保装备安全运行，其健康问题早就引起人们的关注，装备健康管理（EHM）的研究工作也一直在进行之中，但 EHM 作为 Equipment Health Management 的缩略语近些年才开始被使用。装备健康管理是一种对装备及其部件的健康状态及其影响因素进行全面管理和控制的过程。EHM 通过整合设备管理制度和业务流程，以状态维修、定期维修等维修活动为手段，对涉及设备健康的方方面面（日常管理、维护保养、操作使用、状态监测等）进行全过程管理，是一种促进设备全面健康的管理新模式。EHM 初步将 CBM 上升到管理理论体系中来，EHM 与 CBM 的主要区别在于：有效的设备健康管理（EHM）扩展到超出设备监控和修理的范围，而深入到装备的规范化、科学化和智能化管理之中，即从传统的以“修”为主的思路转变到以“管”为主的思路上来。二者之间的关系是：CBM 是 EHM 的重要基础，EHM 拓展了 CBM 的外延。

20 世纪 90 年代初期以来，美英等国对故障预测与健康管理（PHM）技术开展了大量的研究工作，并首先在直升机上得到了应用，具体演变成状态与使用监控系统（HUMS）。2000 年 7 月，美国国防部防务威胁减少局将 PHM 技术列入《军用关键技术》报告中，PHM 开始成为美英等国军方的一个术语。所谓故障预测，即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度；所谓状态管理，是根据诊断、预测信息、可用资源和使用需求对维修活动做出适当决策的能力。综合考虑上述两个方面功能，PHM 是指利用各种传感器在线监测、定期巡检和离线检测相结合的方法，广泛获取设备状态信息，借助各种智能推理算法（物理模型、神经网络、数据融合、模糊逻辑、专家诊断系统等）来评估设备本身的健康状态；在系统发生故障之前，结合历史工况信息、故障信息、试车信息等多种信息资源对其故障进行预测，并提供维修保障决策及实施计划等以实现系统的视情维修。PHM 是机内测试和状态监测能力的拓展，是从状态监测到状态管理的转变，其目的是减少维修耗费、增加战斗完好率、实现自主式保障。其中引入故障预测来预知、识别、管理故障的发生。

设备故障预测与健康状态管理解决方案是状态监控、健康评估、维修决策支持、规划及控制的综合学科。有效的故障预测与健康管理解决方案包含四个主要步骤：量度关键的系统使用参数、确定反常状态及预测初始故障、确定达到最佳工作效果的维修活动、计划与控制维修工作。它支持以可靠性为中心的维修（Reliability - centered Maintenance, RCM）及 CBM 基本原理，且在预测性维修（Predictive Maintenance, PM）及主动性维修实践中得到证明；其重要性超出了设备监控和修理而进入企业管理和业务智能化。对复杂装备进行状态监测与设备健康状态管理可提高装备质量管理水平，建立信息化、智能化维修管理机制。

## 二、PHM 基本组成

### （一）开放式体系结构

目前，PHM 系统在各国的航空航天、国防军事以及工业等领域已经逐步得到应用。视情维修的开放体系结构（Open System Architecture for CBM, OSA - CBM）可用于指导

构建实际应用的 PHM 系统。OSA - CBM 标准体系由美国海军出资组建的工业研究小组进行研究和验证，小组成员遍布 CBM 技术的工业、商业和军事等应用领域。另外，宾夕法尼亚州的应用研究实验室和机械信息管理开放系统联盟（Machinery Information Management Open System Alliance, MIMOSA）等也为此做出了贡献。目前，该体系结构已在包括美军海军舰船、民用车辆、飞机以及其他工业领域内得到验证。

OSA - CBM 标准体系包括以下七个功能模块：

1. **数据获取层 (Data Acquisition)** 该模块为 CBM 系统提供了访问数字传感器数据的接口，也可表示为软件界面与灵敏传感器交互。数据获取层基本上是一个服务器，存储着经过校准的数字传感器的数据记录。

2. **数据处理层 (Data Manipulation)** 该模块接受来自数据获取层或其他信号处理模块的信号和数据，使用专门的 CBM 特征提取算法进行单个或多个信道的信号转换。数据处理层的输出包括过滤后的传感器数据、频谱、实际的传感器信号和其他 CBM 特征量。

3. **状态监控层 (Condition Monitor)** 该模块接受来自数据获取层、数据处理层和其他状态监测层的数据。其主要作用是将特征值与期望值或运行阈值进行比较，输出到状态指示器上，也可以根据事先规定的阈值发出警报。当数据可用时，该模块可以对运行状态或环境产生评估文本。

4. **健康评估层 (Health Assessment)** 该模块接受来自不同的状态监测器或其他健康评估模块的数据。其主要作用是：当被监测的系统、子系统或装备部件退化时，确定它们是否健康。如果健康状态退化，该模块应该能够产生诊断记录，对一个或多个可能的故障状态提出具有一定置信度的建议。健康评估层应当考虑健康历史趋势、工作状况与负荷以及维修历史。

5. **预测层 (Prognostics)** 该模块应当能够从上述各层中获得数据，主要作用是在对未来工作剖面估计的基础上，根据装备当前的健康状态预测装备未来的健康状态。因此，预测层能够报告装备未来的健康状态，或估计在给定计划使用剖面下的装备剩余使用寿命 (Remaining Useful Life, RUL)。装备未来健康或剩余使用寿命与计划的故障状态诊断相关。

6. **决策支持层 (Decision Support)** 该模块接受来自健康评估层和预测层的数据，主要作用是给出维修活动建议和方案选择，包括相关的维修活动时间表，为了完成任务对装备运行配置的修改，或者是在任务能够完成的前提下对任务剖面的修改。决策支持层需要考虑操作历史（包括使用和维修）、当前以及未来的任务剖面、高标准目标和资源约束。

7. **表达层 (Presentation)** 该层是显示健康评估、预测评估或决策支持建议以及报警的人机界面，应该有能力报告异常状态将在什么时间出现。在很多案例中，表达层可根据用户的需求信息进行多层访问。

图 1 - 1 显示了 OSA - CBM 各个模块相互交互并形成完整的综合系统。

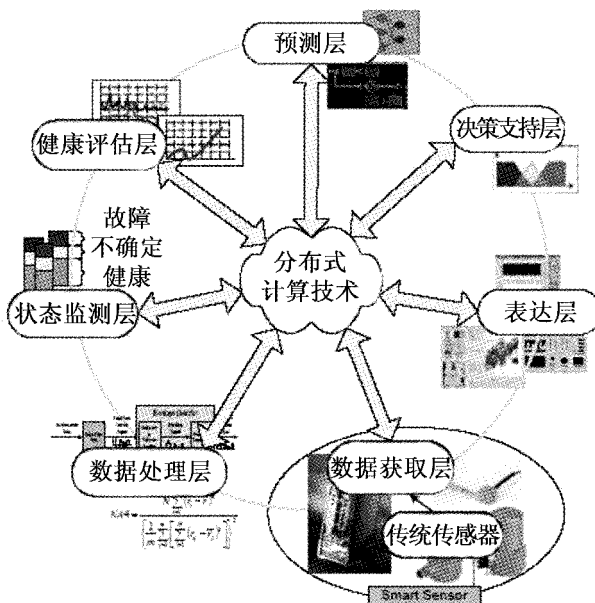


图 1-1 PHM 开放系统设计中的数据流

## (二) 分布式网络平台

复杂装备的地域分布广，综合保障要求高，实施多个现场监测单元的综合诊断与系统的健康管理是必不可少的。分布式网络化设计平台为其实现提供了可行性途径，见图 1-2。

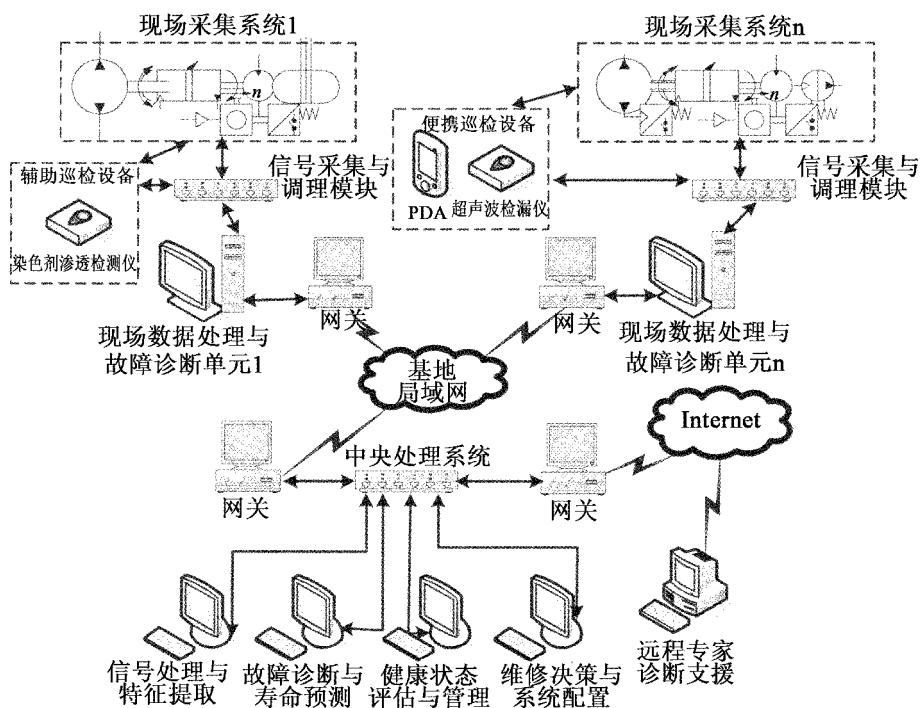


图 1-2 复杂装备状态监测与健康管理系统的组成框架

PHM 的体系结构定义了分布式、松散型、异地协同工作的柔性网络平台。PHM 网络平台一般采用是基于标准协议的三层浏览器/服务器 (B/S) 模型, 建立三级系统模型: 数据现场采集系统、SQL Server 数据库服务器以及 Web 服务器。在 B/S 结构下, 客户端只需要安装浏览器及相关的协议软件, 即可浏览访问服务器, 软件的开发、维护与升级只需在服务器端进行, 减少了系统开发与维护的周期与费用。B/S 模型结构可实现数据管理与用户管理的更大的灵活性与开放性。

### (三) 功能模块设计

PHM 的开放式体系结构和分布式网络平台决定了软件的模块化设计思想。软件组成主要包括两部分: 嵌入式软件和远程软件, 如图 1-3 所表示。

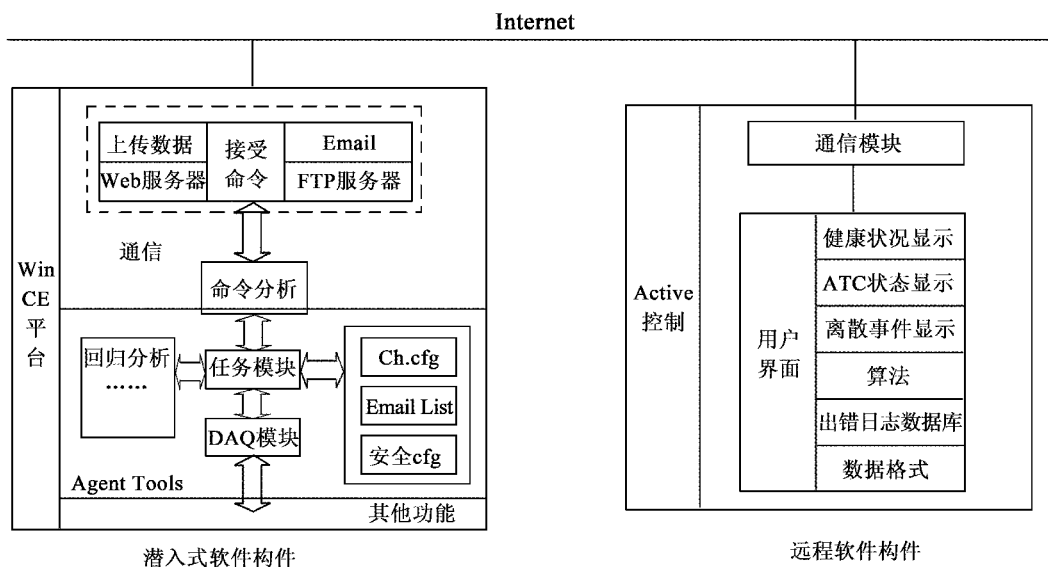


图 1-3 软件结构示意图

嵌入式软件在嵌入硬件环境中运行, 包括: 通信模块、命令分析模块、任务模块、算法模块、功能模块和 DAQ 模块。通信模块负责通过 TCP/IP 协议与远程层进行通信。命令分析模块用于分析不同的远程命令请求。任务模块包括多线程及其管理。算法模块包含指定的监测工具。功能模块的多个辅助功能如: 通道配置、安全配置、电子邮件列表等。DAQ 模块执行 A/D 变换, 利用中断或触发器从不同传感器中获取数据。远程层软件运行于远程计算机上, 由 ActiveX 控制技术实现, 并能作为 Internet Explore 浏览器的组成部分运行。通信模块通过 TCP/IP 协议与嵌入端进行通信。用户界面提供健康管理显示、ATC 状况显示、离散事件显示、算法模块、错误日志数据库和数据格式等信息。

模块化软件结构可实现功能的灵活添加和删除, 并提供软件功能的后续开发环境。

## 三、PHM 发展

从预防性维修、预知维修、视情维修发展到状态监控与故障预测, 进而提出了设备

故障预测与健康状态管理，贯穿其发展的主线是在最小维修、维护、保障费用基础上实现系统的高可靠性、安全性和正常运行。那么 PHM 之后又会是什么样的维修保障模式呢？下面我们就介绍几个新的维修保障概念：

1. **自主后勤保障 (Autonomic Logistics, AL)** 自主后勤保障是一个基于知识的后勤保障系统，由 PHM 和分布式信息系统 (Distributed Information System, DIS) 组成，可辨识综合保障需求、供应链管理、部件可靠性、安全性与训练信息以支持和加强任务的执行。自主后勤保障能够模拟人的智能来进行维修保障，具有有效的预警功能和健康状态管理机制，能准确地预测未来的需要，并能自己思考和行动，在决策与调配保障资源时，能获得一致的保障和最佳的协调性，不需要技术人员的频繁决策与调度，最终目的是建立一个自诊断与自维修系统和一个高度自主的网络化、信息化、一体化的维修保障体系，并将两者密切协同、高度集成组建具有自治性的综合维修保障体系。自主后勤保障体系中，在加强装备自身具有的监测、诊断、隔离故障能力、健康管理能力的同时，也在强调激励整个体系实时共同工作的能力，强调自身的冗余修复与免疫能力的同时，也在强调信息沟通与系统调控的能力，以加强其智能化、信息化、网络化、一体化建设，使整个维修保障机制具备自治性和主动、精确、敏捷、协同的特点。

2. **智能维护系统 (Intelligent Maintenance System, IMS)** 可预测设备性能以实现“接近零事故”。利用先进的状态监测技术及信息处理技术来分析数据并提取其有效的性能衰退信息，将其用于维修决策的智能化，并且通过综合的设备寿命周期管理系统，将预测信息应用于改进设备生命周期的各个方面；在综合视情维修、预防性维修和预测性维修、PHM 基础上，强调利用先进智能技术开发自诊断与自修复功能。IMS 基本组成可参见图 1-4。

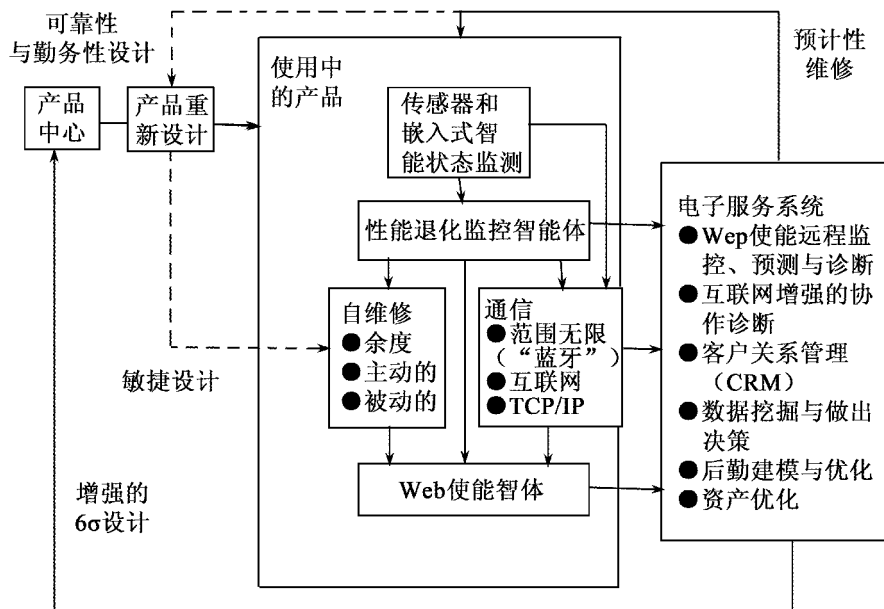


图 1-4 IMS 基本组成

IMS 与其他维修保障概念相比,新加入的自诊断与修复功能,可进行自我监测与诊断,在出现任何故障和性能衰退时,可通过牺牲某些功能来恢复或维持设备某些的必备功能。智能维护系统将功能维修与物理维修首次综合考虑,在机械上增加智能(系统、功能)使其足够“聪明”可实现功能性自修复;也可在设备上增加自我维修触发功能,设备可实现自我监测、自我诊断和自我触发,可提出必要的维修请求并进行维修需求分析。虽然其维修任务仍然由维修人员管理,但设备、维修列表、分配系统和详细目录管理系统的无缝隙融合,将在极大范围内减少维修费用并提高用户满意度。

**3. 数字化维修** 数字化维修保障是一系列与信息技术密切相关的,以可靠性为中心的新的维修概念的总称,它将航空维修看作是一个数据采集、传送、加工处理的工程,最终完成维修“产品”。其核心思想是知识经济时代的维修概念科学化、维修活动程序化、维修信息电子化、维修决策数字化、维修技术智能化。其技术以系统科学和可靠性理论为基础;以信息网络技术为平台;以航空专业理论、故障诊断、自动控制、远程监控、工业工程、表面工程、管理工程等科学技术为手段;以飞机发动机维修方式、维修策略的优化为内容;以维修质量的产生、发展和实现的过程控制为主线,发展具有航空维修行业特色的 CIMS 和 ERP 技术,分别实现维修系统的技术信息和管理信息的集成,并进一步在知识管理的信息技术平台上将维修系统的物质流、信息流、知识流、资金流和价值流集成为一体,实现飞机、发动机全寿命过程使用可靠性的最优控制。数字化维修主要由故障预测与状态管理系统(PHM)、便携式维修辅助装置(PMA)、交互式电子技术手册(IETM)、远程维修系统等关键技术组成,它们之间也是密不可分、相互融合的,只是目前实际应用的各个数字化维修系统的侧重点不同。信息技术、网络技术、计算机技术的飞速发展数字化维修保障系统的发展奠定了坚实基础,对我军装备实现更好的战备完好性,提高装备的维修性、可靠性和保障性,提高维修保障机构的工作效率和保障能力,降低装备的使用与维修费用,具有重要意义。

## 四、PHM 费效分析

PHM 正式实施于 F-35 联合攻击机项目可知,JSF 远景构想是:建立经济可承受的下一代攻击战斗机系统并实现全球保障。该构想的实现是建立在杀伤力、生存性、保障性/部署性及经济承受性四大支柱之上的。美国国防部提出,为保障性和部署性提供经济可承受能力的关键技术在于:预测与健康管理系统(PHM)。PHM 借助状态监控与智能推理技术,利用少数传感器技术及其他技术信息,预测、检测并隔离故障,预计失效时间,同时触发相应的维修活动。PHM 被引入 JSF 计划的关键就在于 PHM 技术可满足降低使用和保障费用的要求。根据 PHM 在国防、航空、大型生产线的应用情况,预计其可为用户带来如下收益:

**1. 维修机制的改变** 状态监测与故障预警功能可覆盖复杂装备的各个重要子系统,提高系统可靠性与安全性;可实现故障的精确定位,减少故障检测与隔离时间,提高维修效率;提供设备剩余寿命预测功能,实现视情维修和预先维修,可显著减少预防性维修任务比例;可触发自主后勤保障系统,提高系统安全性,降低寿命周期维护费用,缩短后勤补给线。



2. **减少测试设备** 可减少中继级和现场级测试设备数量与种类；可减少系统研制与验证过程中35%的专用保障设备；可减少复杂装备专用检测设备的配备数量。

3. **对操作人员及维修人员的益处** 故障信息和故障征兆可实现远程传输与预先诊断，增加维修人员的准备时间，避免错过最佳维修时机，显著改善维修效果；维修资源的综合管理为维修计划的安排提供便利，对合理安排零部件的储存与消耗，减少积压，改进维修进度安排等均有不同程度的帮助；故障预测功能在故障发生之前就提出事先的预警和相应的解决方案，可缩短供应链，提前做出维修进度安排，缩短停机时间等；智能推理机制可降低操作人员及维修人员对维修经验、技能的依赖性。

4. **生产设计方面** 提供设备全寿命跟踪信息，为设备的制造改进、更新设计提供数据依据，可减少设计过程中附加费用。

针对复杂装备执行状态监测与PHM之前确立系统关键部件的状态监测方案，在安装监测设备的附加费用最少的前提下提高PHM费效比，其目的在于：并不是系统所有的部件都需要进行监测，可在RCM分析与扩展FMECA分析基础上以少量传感器与其他检测手段相结合就可实现整个系统的可靠性、安全性维护，也就是说以最小代价实现系统高质量的维修保障。如何保证系统引入PHM带来的收益远远高于其额外增加的状态监测环节所带来的硬件附加费用呢？必要的系统费效比分析是不可缺少的，主要包括如下步骤：

(1) 定义两个系统，一个是不含有PHM的基本系统，一个是包括PHM的系统，为后面的分析提供基础。

(2) 对系统的元件进行可靠性和维修性预计，为进一步分析系统元件的后勤保障能力的费效比提供基础。

(3) 定义PHM有效性的度量方法，为评价PHM是否实现了某些功能提供判据。

(4) 对度量方法进行定量化，从而可以对其进行定量评估。

(5) 估计PHM在减少消费品花费上的影响。

(6) 估计PHM在减少维修人力资源费用上的影响。

(7) 估计PHM在训练费用上的影响。

(8) 估计PHM在后勤设备费用上的影响。

(9) 估计提供PHM更新和不更新情况下的费用，由于构成PHM系统的技术在不断更新，故要不断评估是否需要更新PHM系统。

(10) 计算费效比结果。

(11) 评估PHM在非费用评价利益方面的影响，例如出动强度、重大事故的减少、脚本的减少等。

通过上面的步骤，根据最后得出的由于引入PHM所带来的效益和费用分析结果，进一步修改PHM系统的设计，直至其达到最佳费效比和最优设计结果。

## 五、设计生产定型过程中实施PHM的必要性分析

彻底贯彻PHM，需要在设计生产定型的过程中就考虑到状态监测点的选取、传感器的最佳安装位置、安装环境的设计等。在复杂装备关键部件的论证、设计、定型过程