

# 装备故障预测与 健康管理技术

ZHUANGBEI GUZHANG YUCE YU  
JIANKANG GUANLI JISHU

© 周林 赵杰 冯广飞 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军队“2110”工程项目资助

# 装备故障预测与健康 管理技术

周 林 赵 杰 冯广飞 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以装备故障预测与健康管理系统设计与使用需求为牵引,以故障预测与健康管理系统的关键技术为线索,系统阐述了装备故障预测与健康管理系统的结构设计技术、传感器应用技术、数据处理技术、健康状态评估技术、故障预测技术、状态维修决策技术和验证与评估技术等理论和方法,并通过实例对相应的理论、方法和模型进行应用验证分析。

本书可供装备管理机关和装备论证、研制、生产、试验、部署、使用和保障部门及单位管理人员与工程技术人员阅读,也可作为高等院校研究生、本科生的教学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

装备故障预测与健康管理技术/周林,赵杰,冯广飞编  
著. —北京:国防工业出版社,2015.9  
ISBN 978-7-118-10353-3

I. ①装... II. ①周... ②赵... ③冯... III. ①武器装备—故障检测②武器装备—设备管理 IV. ①E92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 198282 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 15 $\frac{1}{4}$  字数 356 千字

2015 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

随着武器装备集成化、综合化和智能化水平的提高,装备研制的风险越来越大、研制周期越来越长、研制费用越来越高,且对装备的使用与维修保障提出了更高的要求,需要更新装备保障理念、创新装备保障技术、优化装备保障手段,实现装备故障的预防维修和预测维修,以适应装备技术的发展和体系化作战使用要求。

装备故障预测与健康管理技术是先进的测试、诊断技术与装备维修管理理论相结合的产物,其能够有效解决“是否需维修”“故障是什么”和“何时会出现故障”等问题,已经成为提高装备安全性、可靠性、维修性、保障性和可用性的重要手段,引起各国军方和工业部门的广泛关注,都在积极采取各种方法加速该类技术的研究、开发与应用。但由于装备故障预测与健康管理技术属于多学科交叉技术,涉及系统结构设计、传感器应用、数据处理技术、健康状态评估、故障预测、状态维修决策技术和验证与评估等一系列技术,需要系统性的理论与方法支撑,以推动该技术在导弹、雷达、舰船、飞机和卫星等装备中的应用,借助故障预测和健康管理系统来识别和管理故障的发生、规划维修和决策保障,达到降低使用和保障费用、提高装备系统安全性、装备完好性和任务成功性的目的,真正实现基于状态的维修保障。

本书是作者多年的科研与学术成果的总结,是一部集理论与实践为一体的专业著作:一是按照装备故障预测与健康管理系统的结构与功能、设计与使用过程为线索进行内容组织,具有很强的系统性;二是针对装备故障预测与健康管理系统涉及的各项关键技术,从设计和需求角度进行分析,并给出具体实现方法和步骤,具有很强的理论性;三是从某型装备故障预测与健康管理系统的工程实践为背景,并对相关方法和模型进行实例分析,具有很强的实践性。

全书共分8章:第1章从故障预测与健康管理技术的概念和内涵出发,重点阐述故障预测与健康管理系统的结构与功能、产生与发展以及涉及的关键技术;第2章重点讨论故障预测与健康管理系统的结构设计技术,包括典型的结构形式、结构选择方法、结构设计方法和典型装备故障预测与健康管理系统的基本结构;第3章重点讨论故障预测与健康管理系统的传感器应用技术,包括监测对象选择技术、特征参数选取技术、传感器类型选择技术和传感器优化配置技术等;第4章重点讨论故障预测与健康管理系统的数据处理技术,包括数据清理技术、数据分析技术、特征提取技术和数据挖掘技术等;第5章重点讨论装备健康状态评估技术,包括健康状态评估的影响因素、健康状态等级划分方法以及常用的健康状态评估方法及实例;第6章重点讨论装备故障预测技术,包括装备故障预测的内容和特点,以及常用的装备故障预测方法及实例;第7章重点讨论装备状态维修决策技术,包括状态维修决策的内容和特点,以及装备状态维修行为决策、维修时机预测和维修检测间隔期决策方法等;第8章重点讨论故障预测与健康管理系统验证与评估技术,包括



故障预测与健康管理系统的设计开发流程、系统验证与确认技术和系统综合评估技术等。

本书在成稿过程中得到了陶建锋教授、王明宇教授、赵英俊教授、张永顺教授、谢军伟教授等的指导与帮助,并得到吴法文教授、唐晓兵副教授、王宏副教授等的大力支持,作者对他们的辛勤付出表示衷心的感谢。本书引用了国内外专家学者的研究成果,作者对列入或未列入参考文献的专家学者在该领域所做出的贡献和无私的奉献表示崇高的敬意,对能引用他们的成果感到十分荣幸并表示由衷的谢意。

限于编者的水平,不妥与错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

编著者

2015年4月于空军工程大学防空反导学院

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 PHM 的概念、内涵及其作用	1
1.1.1 PHM 的概念	1
1.1.2 PHM 的内涵	3
1.1.3 PHM 的作用	4
1.2 PHM 系统的结构和基本功能	5
1.2.1 OSA - CBM 体系结构	5
1.2.2 PHM 系统的信息结构	6
1.2.3 PHM 系统的基本功能	7
1.3 PHM 技术的产生与发展	7
1.3.1 PHM 技术的产生	7
1.3.2 PHM 技术的发展	8
1.3.3 美国国防部和 NASA 的 PHM 技术演变过程	11
1.4 PHM 系统涉及的关键技术	12
1.4.1 结构设计技术	12
1.4.2 传感器应用技术	12
1.4.3 数据处理技术	12
1.4.4 健康状态评估技术	13
1.4.5 故障预测技术	13
1.4.6 状态维修决策技术	13
1.4.7 验证与评估技术	14
第 2 章 PHM 系统结构设计技术	15
2.1 PHM 系统的结构形式	15
2.1.1 集中式体系结构	15
2.1.2 分布式体系结构	16
2.1.3 分层融合式体系结构	17
2.2 PHM 系统结构形式的选择	18
2.2.1 PHM 系统结构形式的特征	18
2.2.2 PHM 系统结构形式选择的影响因素	18
2.2.3 PHM 系统结构形式选择原则	19
2.3 PHM 系统结构设计方法	19
2.3.1 PHM 系统体系结构描述方法	20

2.3.2	PHM 系统体系结构设计方法	22
2.3.3	PHM 系统体系结构验证评估方法	27
2.4	典型装备的 PHM 系统结构	35
2.4.1	航空装备 PHM 系统的体系结构	35
2.4.2	航天装备 PHM 系统的体系结构	36
2.4.3	地空导弹装备 PHM 系统的体系结构	38
2.4.4	舰船装备 PHM 系统的体系结构	40
2.4.5	雷达装备 PHM 系统的体系结构	41
<b>第 3 章</b>	<b>PHM 系统传感器应用技术</b>	<b>43</b>
3.1	监测对象选择技术	43
3.1.1	监测对象选择需考虑的因素	43
3.1.2	监测对象选择方法	43
3.1.3	监测对象的类型	50
3.2	状态特征参数选取技术	51
3.2.1	装备故障特征及故障规律	51
3.2.2	监测对象的故障模式	57
3.2.3	监测对象状态特征参数选取	62
3.3	状态监测传感器选择技术	66
3.3.1	PHM 系统对传感器的要求	67
3.3.2	PHM 系统常用传感器类型	71
3.3.3	PHM 系统监测传感器选择	78
3.4	传感器优化配置技术	80
3.4.1	传感器优化配置的复杂性分析	80
3.4.2	传感器优化配置过程	83
3.4.3	传感器优化配置的有效独立法	84
3.4.4	传感器优化配置的符号定向图法	87
3.4.5	传感器优化配置的粒子群算法	88
3.4.6	传感器优化配置的混合蛙跳算法	92
<b>第 4 章</b>	<b>PHM 系统数据处理技术</b>	<b>97</b>
4.1	数据清理技术	97
4.1.1	缺失数据处理技术	97
4.1.2	异常数据剔除技术	100
4.1.3	数据无量纲处理技术	105
4.2	数据分析技术	107
4.2.1	描述性分析技术	107
4.2.2	动态分析技术	110
4.2.3	相关分析技术	113
4.2.4	回归分析技术	115
4.2.5	聚类分析技术	118

4.2.6	数据平滑技术 .....	122
4.3	特征提取技术 .....	124
4.3.1	离散傅里叶变换 .....	124
4.3.2	离散小波变换 .....	124
4.3.3	卡洛南-洛伊变换 .....	125
4.3.4	主分量分析法 .....	126
4.3.5	Hadamard 变换法 .....	128
4.3.6	BP 神经网络法 .....	129
4.4	数据挖掘技术 .....	130
4.4.1	决策树算法 .....	130
4.4.2	人工神经网络算法 .....	133
4.4.3	粗糙集算法 .....	136
4.4.4	遗传算法 .....	138
<b>第 5 章</b>	<b>装备健康状态评估技术 .....</b>	<b>143</b>
5.1	装备健康状态评估概述 .....	143
5.1.1	装备健康状态的影响因素 .....	143
5.1.2	装备健康状态评估的特点 .....	144
5.1.3	装备健康状态评估常用方法 .....	144
5.2	装备健康状态分级技术 .....	145
5.2.1	健康状态分级原则 .....	145
5.2.2	健康状态等级划分方法 .....	146
5.2.3	健康状态等级描述 .....	146
5.3	基于 FMECA 的装备健康状态评估 .....	147
5.3.1	健康状态评估参数的选取 .....	147
5.3.2	健康状态评估的步骤 .....	147
5.3.3	健康状态评估实例分析 .....	149
5.4	基于测试数据的装备健康状态评估 .....	152
5.4.1	测试数据的归一化处理 .....	152
5.4.2	D-S 证据合成规则 .....	153
5.4.3	健康状态指数的时间修正 .....	154
5.4.4	健康状态等级隶属度函数 .....	155
5.4.5	健康状态评估的步骤 .....	156
5.4.6	健康状态评估实例分析 .....	157
5.5	基于劣化度的装备健康状态评估 .....	159
5.5.1	劣化度及其计算方法 .....	159
5.5.2	健康状态评估模型 .....	160
5.5.3	健康状态评估过程 .....	160
5.5.4	健康状态评估实例分析 .....	162



<b>第 6 章</b>	<b>装备故障预测技术</b>	166
6.1	装备故障预测技术概述	166
6.1.1	装备故障预测的概念	166
6.1.2	装备故障预测的内容	167
6.1.3	装备故障预测的特点	167
6.1.4	装备故障预测常用方法	168
6.2	基于 ARMA 模型的装备故障预测	171
6.2.1	ARMA 模型分析	171
6.2.2	故障预测的步骤	172
6.2.3	故障预测实例分析	176
6.3	基于改进 GM(1,1)模型的装备故障预测	178
6.3.1	传统的 GM(1,1)模型	178
6.3.2	GM(1,1)模型的灰色预测	179
6.3.3	新陈代谢 GM(1,1)模型	179
6.3.4	故障预测实例分析	180
6.4	基于遗传神经网络的装备故障预测	182
6.4.1	遗传算法基本原理	182
6.4.2	遗传神经网络原理	183
6.4.3	故障预测性能评价指标	184
6.4.4	故障预测实例分析	185
<b>第 7 章</b>	<b>装备状态维修决策技术</b>	187
7.1	装备状态维修决策概述	187
7.1.1	状态维修决策的概念	187
7.1.2	状态维修决策的内容	188
7.1.3	状态维修决策的特点	188
7.1.4	状态维修决策常用方法	189
7.2	基于模糊多属性决策的装备维修行为决策	190
7.2.1	模糊多属性决策基本原理	190
7.2.2	模糊多属性决策方法	191
7.2.3	模糊多属性决策步骤	192
7.2.4	状态维修行为决策实例分析	192
7.3	基于比例风险模型的装备维修时机预测	194
7.3.1	威布尔比例风险模型	194
7.3.2	威布尔比例风险维修决策模型	197
7.3.3	状态维修时机决策实例分析	198
7.4	基于实时可靠性评估的状态检测间隔决策	199
7.4.1	实时可靠性评估原理	200
7.4.2	状态检测间隔期决策模型	200

7.4.3	状态检测间隔决策实例分析 .....	203
<b>第8章</b>	<b>PHM系统验证与评估技术 .....</b>	<b>204</b>
8.1	PHM系统验证与评估概述 .....	204
8.1.1	PHM系统设计阶段划分 .....	204
8.1.2	PHM系统设计流程分析 .....	205
8.1.3	PHM系统验证与评估常用方法 .....	206
8.2	PHM系统验证技术 .....	207
8.2.1	PHM系统验证框架 .....	208
8.2.2	PHM系统验证试验环境 .....	208
8.2.3	PHM系统验证指标体系 .....	212
8.3	PHM系统评估技术 .....	215
8.3.1	PHM系统使用效益评估 .....	215
8.3.2	PHM系统技术成熟度评估 .....	220
8.3.3	PHM系统研制风险评估 .....	225
8.4	PHM系统开发的标准体系 .....	230
8.4.1	国外PHM系统标准分析 .....	230
8.4.2	PHM系统标准体系构建原则 .....	235
8.4.3	PHM系统标准体系框架结构 .....	235
8.4.4	PHM系统研制工作指导 .....	236
<b>参考文献</b>	.....	<b>237</b>

# 第 1 章 概 述

故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)技术是先进的测试技术、诊断技术与装备维修管理理论相结合的产物,借助故障预测与健康管理系统来识别和管理故障的发生、规划维修和决策保障,以达到降低装备使用与保障费用,提高装备安全性、完好性和任务成功性的目的,真正实现基于状态的维修保障。

## 1.1 PHM 的概念、内涵及其作用

故障预测与健康管理技术是随着维修理念的转变和维修方式的变革而发展起来的一项最新技术,其有效地实现了由传统的事后维修向状态维修的转变,由对故障的被动反应转向故障的主动预防,由传统的事后故障诊断转向基于智能系统的故障预测,实现在准确的时间对准确的部位进行正确的维修活动。

### 1.1.1 PHM 的概念

PHM 是指利用各类先进传感器实时监测装备运行的各类状态参数及特征信号,借助各种智能推理算法和模型(如物理模型、专家系统、神经网络、模糊逻辑等)来评估装备的健康状态,在其故障发生前对故障进行预测,并结合各种可利用的资源信息提供一系列的维修保障决策,以实现装备的状态维修。

简单地说,PHM 就是借助各种算法和模型,找到故障征兆和故障原因的映射关系,推导出故障的原因及部位,并对征兆趋势进行跟踪,对可能发生的故障进行预测,指出故障发展趋势和后果,以及部件的剩余寿命,最后通过维修决策合理调配维修保障资源,制定最佳维修保障方案。

PHM 涉及的相关概念:

#### 1) 状态维修

状态维修(Condition Based Maintenance, CBM)的概念产生于 20 世纪 40 年代,已经成为现代维修理论和应用研究的热点,但尚未形成统一的、标准的定义。美国工业界对状态维修的定义是:状态维修是试图代替固定检修的时间周期而根据设备状态确定的一种维修方式。英国标准协会(BS3811)在 1993 年对状态维修的定义是:状态维修是根据状态监测技术所指示的设备状态的需要而执行的维修活动。陈学楚教授在《现代维修理论》一书中,对状态维修的定义是:状态维修是指通过对设备状态进行监测,并且按设备的健康状态来安排维修的一种决策方法(或策略)。

从状态维修的各种定义可知,状态维修的基本思想是:通过先进的状态监测技术获取反映装备状态的有关信息,利用信号分析、故障诊断、可靠性评估、寿命预测等技术,判断装备的状态,识别故障的早期征兆,对故障部位及其严重程度、故障发展趋势做出判断,并

根据诊断和预知的结果来推荐最佳的维修策略。

## 2) 故障诊断

故障诊断(Fault Diagnosis)是指利用被诊断对象的各种状态信息和已有的各种知识,进行信息的综合处理,最终得到关于装备运行和故障状况综合评价结果的过程。故障诊断的基本目标是确定诊断对象有无故障,若有故障,则进一步确定故障的性质、原因、类型,以及发生的部位等。故障诊断主要包含以下4个方面的内容:

(1) 故障建模。按照先验信息和输入输出关系,建立装备系统故障的数学模型,作为故障检测和故障诊断的依据。

(2) 故障检测。从可测或不可测的估计变量中,判断运行的装备是否发生故障,一旦装备发生意外变化,应发出报警信息。

(3) 故障分离与估计。当装备发生了故障,给出故障源的位置,区别出故障原因,计算故障的程度、大小及故障发生的时间等。

(4) 故障分类、评价与决策。判断故障的严重程度,以及故障对装备的影响和发展趋势,针对不同的工况采用不同的措施。

## 3) 故障预测

故障预测(Fault Prognostics)是指以装备的使用状态为起点,结合已知的装备结构特性、性能参数、环境条件及运行历史(包括运行记录和曾发生过的故障及修复记录),对装备未来时间或任务段内可能发生的故障进行预报、分析和判断,确定故障性质、类别、程度、原因及部位,指出故障发展趋势及后果,包括确定装备的剩余寿命、故障发生的概率或正常工作的时间等。

故障预测是比故障诊断更高级的维修保障形式,故障预测又称为预计性故障诊断或事前故障诊断,其目的如下:

(1) 预测故障发生时间,即预测装备系统、子系统、部件各种故障模式的故障发生的时间。

(2) 预测剩余寿命或可正常工作时间,即预测装备系统、子系统、部件的剩余寿命或可继续正常使用的时间长度。

(3) 预测故障发生概率,即预测在下次检查或维修前装备系统、子系统、部件发生故障的概率。

## 4) 健康状态

健康状态(Health Condition)是指装备系统、子系统、部件的整体状态,是对装备系统、子系统、部件在执行其设计功能时所表现出的能力的描述。

根据装备系统、子系统、部件执行其设计功能时的表现,可将健康状态分为健康、良好、注意、恶化和疾病5个等级:

(1) “健康”状态。装备处于“健康”状态,是指所有测试数据均远离使用规程中的注意值,且与优质产品的设计值相近,装备可完全执行其设计功能。

(2) “良好”状态。装备处于“良好”状态,是指所有监测数据均远未达到使用规程中的注意值,与同类产品相比相当或偏好,装备可正常执行其设计功能。

(3) “注意”状态。装备处于“注意”状态,是指所有测试数据均在允许范围内,但部分参数达到了规程中的注意值,装备可基本执行其设计功能。

(4) “恶化”状态。装备处于“恶化”状态,是指大部分监测数据接近使用规程中的注意值,少部分参数超过注意值且接近故障阈值,装备可基本执行其设计功能,但执行效率降低。

(5) “疾病”状态。装备处于“疾病”状态,是指所有测试数据均达到或超过使用规程中注意值,且多个参数达到或超过阈值,装备基本不能执行其设计功能。

#### 5) 状态监测

状态监测(Condition Monitor)是指根据装备系统的状态特征,利用各种传感器和检测设备,连续或定期采集装备系统的状态特征参数,并对其进行分类和解译。一般来讲,装备系统的大多数故障,在其发生前都会有某些征兆,其相应的参数会发生一系列的变化,装备监测的征兆可分为以下几种类型:

(1) 动力学效应,即通过对振动波、脉冲波和声波等的监测,来评估装备系统的健康状态。

(2) 颗粒效应,即通过监测油液中金属颗粒的成分、大小、形状及密度的变化,来评估装备系统的健康状态。

(3) 化学效应,即通过监测环境中化学元素的成分、数量和密度的变化,来评估装备系统的健康状态。

(4) 物理效应,即通过监测装备系统的外观、结构和尺寸的物理变化,来评估装备系统的健康状态。

(5) 温度效应,即通过监测装备系统自身及环境温度的变化,来评估装备系统的健康状态。

(6) 电学效应,即通过监测装备系统中的电阻、电压、电流参量的变化,来评估装备系统的健康状态。

#### 6) 状态评估

状态评估(Condition Assessment)是指以先进的状态监视手段、可靠的评价方法和完整的运行数据来判断装备所处的健康状况。状态评估的主要目的如下:

- (1) 确定潜在性故障发生时刻。
- (2) 查明故障隐患和初期异常。
- (3) 鉴定和定位故障的根源。
- (4) 预测装备的剩余寿命或可正常工作时间。

### 1.1.2 PHM 的内涵

PHM 技术最早是由美国军方提出的,其实现了从装备状态监控到健康管理思想的转变。PHM 的本质内涵主要体现在以下 6 个方面:

#### 1) PHM 是一项新的维修保障技术

PHM 是一种全面故障检测、隔离、预测及健康管理技术,它的引入不是为了直接消除故障,而是为了了解和预报故障何时可能发生;或在出现始料未及的故障时触发一种简单的维修活动,从而实现自主式保障,达到降低装备使用和保障费用的目标。

#### 2) PHM 代表了维修理念的转变

PHM 技术在装备维修保障中的应用,实现了从传统的基于传感器的诊断转向基于智



能系统的预测,由反应式的通信转向在准确时间对准确部位进行准确维修的先导式活动,极大地促进了状态维修取代事后维修和定期维修的进程。

### 3) PHM 是对 BIT(Built-in,机内测试)和状态监控技术的拓展

PHM 系统采用开放式系统结构,其利用先进传感器的集成,借助各种算法(如快速傅里叶变换、离散傅里叶变换)和智能模型(如专家系统、神经网络、模糊逻辑等)来预测、监控和管理武器装备的健康状态,是对 BIT 和状态监控技术的进一步拓展。

### 4) PHM 是实现精确故障诊断的重要手段

PHM 系统采用先进的传感器,借助各种算法和智能模型来预测、监控和管理装备的工作状态,其最大程度地利用传统的故障特征检测技术,并综合先进的软件建模,能够获得虚警率几乎为零的精确故障检测和隔离结果。

### 5) PHM 是实现装备状态维修的重要途径

PHM 系统具有状态监控、故障预测、检测隔离、寿命跟踪、故障报告和寿命预测等功能,能够实时掌握装备的工作状态,有效提高装备的安全性和任务可靠性,实现由事件主宰的维修(事后维修)或时间相关的维修(定期维修)被基于状态的维修(视情维修)所取代,是实现装备状态维修的重要手段。

### 6) PHM 是提高装备维修保障效率的重要保证

PHM 系统可有效降低装备维修保障费用、提高装备战备完好率和任务成功率:一是通过传感器的数据融合最大限度地增强故障检测能力;二是通过状态感知和智能模型预测故障,可减少任务过程中故障引起的风险,提高任务成功率;三是通过维修决策合理调配维修资源,减少备件、设备、人员等保障资源需求,降低维修保障费用;四是通过减少维修,缩短维修时间,提高装备战备完好率。

## 1.1.3 PHM 的作用

PHM 的作用主要体现在以下 3 个方面:

### 1) 解决“是否需维修”问题

PHM 系统依据获取的装备状态监测信息,判断当前装备系统处于其性能退化过程中的哪一种健康状况,是正常态、性能下降态或某一功能失效态,并估计当前的状态偏离正常态的程度大小。其属于状态监测与健康管管理,解决的是“是否需维修”问题。

### 2) 解决“故障是什么”问题

PHM 系统依据当前装备系统的健康状况决定是否需维修,若需要维修,则进一步判断装备系统是由于何种故障模式引起其健康水平的下降,从而对故障模块或部件尽早进行检测与识别,以免装备系统故障的发生。其属于早期故障诊断与识别,解决的是“故障是什么”问题。

### 3) 解决“何时会故障”问题

PHM 系统依据当前装备系统的健康状况,如装备系统不需要维修,则继续监测装备系统运行状态并故障预测,即确定未来时间(下一次任务之内)装备系统是否能正常完成其功能,并根据过去和现有的状态预测出未来某时间的状态,从而可以做到提前预警。其属于故障预测,解决的是“何时会故障”问题。

## 1.2 PHM 系统的结构和基本功能

PHM 技术在航空航天、国防军事以及工业领域的应用,形成了不同类型的 PHM 系统,如直升机健康与使用监测系统(Health and Usage Monitoring System, HUMS),航天器集成健康管理系统(Integrated Vehicle Health Management System, IVHMS),飞机状态监测系统(Aircraft Condition Monitoring System, ACMS)、发动机监测系统(Engine Monitoring System, EMS)、综合诊断预测系统(Integrated Diagnostics and Prognostics System, IDPS),海军综合状态评估系统(Integrated Condition Assessment System, ICAS)等。虽然 PHM 系统的类型及应用目的、技术和方法不同,但体现的基本思想是类似的,其中,以视情维修的开放体系(Open System Architecture for Condition - Based Maintenance, OSA - CBM)最为典型,其很好地综合了这些系统共同的设计思想和设计方法。

### 1.2.1 OSA - CBM 体系结构

OSA - CBM 体系结构,是由美国波音公司牵头,来自工业制造、军事、商业制造、传感器技术以及科研院所等 10 多个组织机构联合制定的,其综合了各类 PHM 系统的共同设计思想、应用技术和方法,可用于指导构建用于机械、电子和结构等领域的各种类型的 PHM 系统,且该体系结构已在美军舰船、飞机、车辆及工业领域中得到初步的应用和验证。OSA - CBM 的体系结构如图 1 - 1 所示。

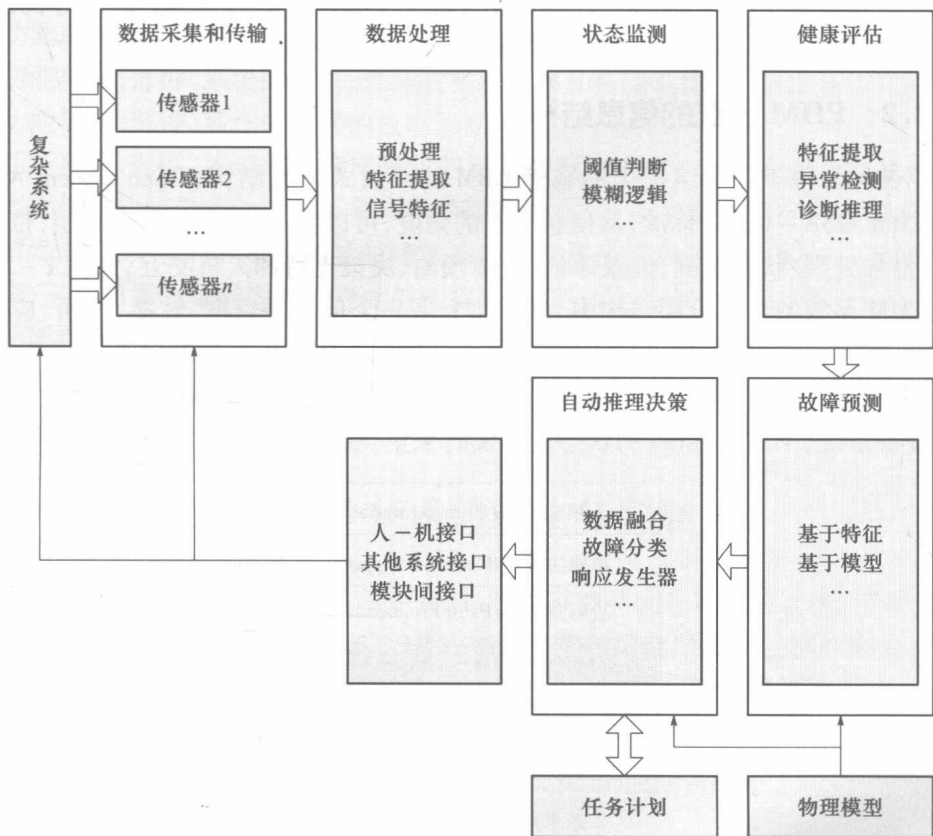


图 1 - 1 OSA - CBM 体系结构

OSA - CBM 体系结构主要由数据采集和传输、数据处理、状态监测、健康评估、故障预测、自动推理决策及接口 7 个部分构成。

(1) 数据采集和传输。该部分利用各种无源和智能传感器采集装备系统的相关参数信息,作为 PHM 系统的数据基础,并且还具有数据转换以及数据传输等功能。

(2) 数据处理。该部分接受来自传感器以及其他数据处理模块的信号和数据,并将数据处理成后继的状态监测、健康评估和故障预测等部分处理要求的格式。其输出结果包括经过滤和压缩简化后的传感器数据、频谱数据以及其他特征数据等。

(3) 状态监测。该部分接受来自传感器、数据处理以及其他状态监测模块的数据,然后将这些数据同预定的失效判据等进行比较来监测装备系统当前的状态。并且可根据预定的各种参数指标极限值/阈值进行故障报警。

(4) 健康评估。该部分接受来自不同状态监测模块以及其他健康评估模块的数据,进行被监测系统(也可以是分系统、部件等)的健康状态(如是否有参数退化现象等)评估,形成故障诊断记录并确定故障发生的可能性。

(5) 故障预测。该部分综合利用前述各部分的数据信息,对被监测系统进行状态评估和预测未来的健康状态,包括剩余寿命、可正常工作时间等。

(6) 自动推理决策。该部分接受来自状态监测、健康评估和故障预测部分的数据,通过推理决策产生更换、维修等活动的建议与措施。

(7) 接口。该部分主要包括人一机接口和机—机接口:人一机接口包括状态监测模块的警告信息显示以及健康评估、故障预测和决策支持模块的数据信息表示等;机—机接口用于实现各模块之间以及 PHM 系统同其他系统之间的数据信息传递。

### 1.2.2 PHM 系统的信息结构

依据美国海军工业小组提出的基于 CBM 的开放式体系结构(Open System Architecture for CBM,OSA - CBM)标准,从信息交互的角度,可以将 PHM 系统分为 7 层,依次为数据采集、信号处理、状态监测、健康评估、故障预测、决策支持和人机交互,如图 1 - 2 所示。

在 PHM 系统的功能分层结构中,自下而上是一个信息的获取、转换、分析、应用和展示的过程;自上而下则是一个命令或配置信息下达的过程。各层的功能如下:

(1) 数据采集层(Data Acquisition Layer)。数据采集层主要由状态监测传感器和 BIT 完成对装备系统、子系统、部件的状态进行实时采集,获得关于监测对象的状态特征参数。



图 1 - 2 PHM 系统的功能分层

(2) 数据处理层(Data Manipulation Layer)。数据处理层主要完成对来自装备状态监测传感器和 BIT 的状态特征数据进行处理,转换成 PHM 系统所要求的形式和特征。

(3) 状态监测层(Condition Monitor Layer)。状态监测层主要实现对装备系统、子系统、部件特性的测试及报告,主要输入为经过信号处理后的来自各传感器及 BIT 的数据,输出为关于系统、子系统、部件的状态或条件。

(4) 健康评估层(Health Assessment Layer)。健康评估层主要实现对装备的部件、子系统、系统的状态进行评估,并报告所评估的系统、子系统、部件的健康情况。

(5) 故障预测层(Fault Prognostics Layer)。故障预测层主要是对装备的部件、子系统、系统的状态变化趋势进行预测,进行给定使用包线下的剩余寿命估计。

(6) 决策支持层(Decision Support Layer)。决策支持层主要完成对装备系统的维修决策,包含任务/运行能力评估和计划、维修推理机和维修资源管理等。

(7) 人机交互层(Human Interface Layer)。人机交互层主要完成装备 PHM 系统与使用者的接口交换,进行状态监测信息、健康评估信息、故障预测信息及维修决策信息的显示,同时接收装备管理人员的干预信息。

### 1.2.3 PHM 系统的基本功能

PHM 系统是在装备有异常征兆,而其工作状态仍然处于可以接受的工作范围时,判断未来时刻故障是否发生。它除了要判断故障有无以外,还要判断故障的类型,以便于事先采取合理的补救措施以预防装备的完全故障。因此,PHM 系统应具备以下主要功能:

(1) 功能单元、部件、系统的状态监测功能。

(2) 功能单元、部件、系统的状态、性能数据的采集和传输功能。

(3) 功能单元、部件、系统的增强的故障诊断功能。

(4) 功能单元、部件、系统的故障预测和剩余寿命预计功能。具体包括 3 项内容:一是早期检测部件或功能单元的故障征兆或初始故障状态,并根据装备运行的实际状况预测剩余使用寿命;二是预计在部件初始故障状态向最终失效发展过程中的任一时间的剩余使用寿命;三是积累装备限寿件的寿命消耗情况。

(5) 功能单元、部件、系统状态管理功能。在装备存在功能降级情况下,能够保证最大程度地完成工作。具体包括:根据装备实际的和预计的材料状况进行维修、供应和其他维修保障活动。

## 1.3 PHM 技术的产生与发展

一般来讲,新技术都是伴随着人类认识自然、利用自然和改造自然的进程而产生与发展的,PHM 作为一项新技术,其演变过程正是人类认识和利用自然规律过程的典型反映,即从对故障和异常事件的被动反应,到主动预防,再到事先预测和综合规划管理。

### 1.3.1 PHM 技术的产生

1) PHM 技术的起源

PHM 技术起源于 20 世纪 50 到 60 年代。当时人类的活动已经由地面、海上延伸到