

软件管理工程精品

SOFTWARE HEALTH MANAGEMENT TECHNOLOGY AND APPLICATION

软件健康管理技术与应用

蔡远文 解维奇 程龙 辛朝军◎著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

软件健康管理技术与应用

蔡远文 解维奇 程 龙 辛朝军 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

软件健康管理是近几年才兴起的一个综合性研究方向,涉及软件的信息获取技术、异常检测技术、故障诊断技术、健康评估技术及故障修复技术等多个方面,通过对软件工作过程的监控和分析处理,达到提高软件运行安全性和可靠性的目的。本书对软件健康管理的发展、基本概念、研究成果等内容进行了全面梳理;对软件健康管理的基本理论与方法进行了系统的论述,主要包括软件故障模式分析、软件传感器技术、异常检测与故障诊断算法、健康度量技术及故障修复技术等。本书特别对软件的异常检测算法、基于贝叶斯网络的软件健康管理、基于定时故障传播模型的软件健康管理和软件健康度量方法进行了较为深入的论述。

本书作为对软件健康管理技术进行系统、全面研究的书籍,适用于计算机学科专业的研究生,也可作为相关学科专业的教学参考书,以及从事软件开发、测试、应用的科技人员的参考书和培训教材等。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

软件健康管理技术与应用 / 蔡远文等著. —北京:电子工业出版社, 2016.9

ISBN 978-7-121-29766-3

I. ①软… II. ①蔡… III. ①软件开发—项目管理 IV. ①TP311.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 202660 号

责任编辑:徐蔷薇

特约编辑:刘广钦 刘红涛

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:18 字数:371 千字

版 次:2016 年 9 月第 1 版

印 次:2016 年 9 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: xuye@phei.com.cn。

PREFACE

随着软件在工业、医疗、国防、航空航天等领域的广泛应用，其所占的功能比例越来越高，软件中的错误对系统造成的影响也越来越大，尤其在安全关键领域甚至会导致灾难性的事故。尽管软件系统在设计和实施的过程中都已经经过严格的验证和确认测试（V&V），但随着软件规模和复杂性的增加，现代软件系统可以表现出多种失效模式，而这些失效模式可能在某个验证和确认过程中未被检测出来。因此，如何提高软件的安全性和可靠性，尤其是软件运行时的安全性和可靠性，最大限度地降低软件异常的影响，已成为摆在软件研究和软件应用人员面前的一个难题。美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）最早意识到了这个问题，并在 2009 年明确将“软件健康管理”列为未来集成运载器健康管理（Integrated Vehicle Health Management, IVHM）的四大研究方向之一。

软件健康管理已经成为健康管理技术的一个重要分支，包括软件故障模式分析、软件传感器技术、异常检测与故障诊断算法、健康度量技术、故障修复技术等方面的内容。主要目的是通过实时监控运行软件，对可能的异常情况进行检测、识别、定位和评估，并采取启动冗余备份、重启、复位等减缓措施，保证软件的安全性或将异常情况的影响降到最低程度。软件健康管理技术对提高软件运行时的安全性和可靠性具有重要意义。

软件健康管理技术近几年获得到了较快的发展，主要是美国等国外的一些研究机构 and 大学对其进行了较系统和深入的研究，国内进行了一些零散的研究。目前在对软件健康管理相关内容的总体认识、软件健康管理相关模型及框架的设计、相关关键技术及在部分系统中的应用研究等方面都取得了一定的成果。但是，这些研究成果相对比较分散，到目前为止还没有一本系统反映软件健康管理技术的学术著作。本书的目的是系统论述软件健康管理技术的基本理论与方法，为软件工程领域健康管理技术的研究与应用提供借鉴。

软件健康管理技术发展方兴未艾。作为一本学术专著，很难包括该领域所有方面的研究与进展，本书主要反映了作者近几年在这方面的研究结果，包括软件健康管理基本内容、软件故障模式分析、异常检测算法、故障推理模型、健康度量方法、故障修复技术等。全书共 9 章，第 1、2 章由蔡远文执笔，第 3 章由程龙执笔，第 4~8 章由解维奇执笔，第 9 章由辛朝军执笔，全书由蔡远文、解维奇负责统稿。夏长峰、王刚、李朝凤、许国锋、成蕊、苗继松、赵征宇、王磊、邢晓辰等承担了大量的绘图和后期的文字校对和录入等工作，在此表示衷心的感谢。

感谢北京系统工程研究所王峰研究员，北京航空航天大学陆民燕研究员、吴玉美博士，装备学院姚静波副教授、李岩讲师，北京航天飞行控制中心任江涛助理研究员。他们提供了大量的研究线索和思路，给予了很好的意见和建议，没有他们的大力支持和无私帮助，本书是难以呈现在读者面前的。本书还参考和引用了一些论文和书籍的内容，在此也一并向有关作者表示衷心的感谢。

最后，还要特别感谢电子工业出版社的编辑徐蔷薇，在本书的编写过程中始终给予很多富有建设性的意见和建议。

软件健康管理技术是新兴交叉学科发展的产物，很多理论方法和应用技术问题还有待进一步深入探索和发展。由于作者水平有限，加之时间仓促，疏漏和不足之处在所难免，希望得到广大读者的批评指正。

作者

2016年7月于雁栖湖畔

缩 略 词

- ACMS: Aircraft Condition Monitoring System, 飞机状态监测系统
- ACF: ARINC Component Framework, ARINC 构件框架
- ACM: Automated Contingency Management, 自主应急管理
- AE: Absolute Error, 绝对误差
- ADAPT: Advanced Diagnostic and Prognostic Test bed, 先进诊断与预测测试台
- ADIRU: Air Data Inertial Reference Unit, 大气数据惯性基准组件
- AHMS: Airplane Health Monitoring System, 飞机健康监测系统
- AO: Additive Outlier, 附加异常
- ARC: Ames Research Center, 阿姆斯研究中心
- ASW-RTS: Adaptive Sliding Window-Rolling Time Series, 自适应滑窗时间序列
- BIT: Built-in Test, 内置测试
- BN: Bayesian net works, 贝叶斯网络方法
- BBN: Bayesian Belief Network, 贝叶斯信度网络
- BP: Back Propagation, 反向传播
- CBSD: Component Based Software Development, 基于构件的软件开发
- CCM: CORBA Component Model, CORBA 构件模型
- CD-SHM: Concept Development for Software Health Management, 软件健康管理概念发展
- CLHM: Component-Level Health Management, 构件级健康管理
- CMM: CORBA Component Model, CORBA 构件模型
- CM: Configuration Management, 配置管理
- CORBA: Common Object Request Broker Architecture, 通用对象请求代理体系结构
- COM: Component Object Model, 构件对象模型
- CPT: Conditional Probability Table, 条件概率表
- CR: Change Request, 需求变更
- DAG: Directed Acyclic Graph, 有向无环图
- DBN: Dynamic Bayesian Network, 动态贝叶斯网络
- DCA: Discriminant Coordinates Analysis, 判别坐标分析法
- DCOM: Distributed Component Object Model, 分布式构件对象模型

- DoD: Department of Defence, 美国国防部
- DSP: Digital Signal Processing, 数字信号处理
- DTA: Decision Tree Analysis, 决策树分析
- EDF: Equal Distance Front, 等距面
- EMS: Engine Monitoring System, 发动机监测系统
- ETA: Event Tree Analysis, 事件树分析
- FCA: Fault Containment Areas, 故障包含区域
- FCM: Fault Containment Modules, 故障包含模块
- FDIR: Fault Detection Isolation and Recovery, 故障检测、隔离于恢复
- FFT: Fast Fourier Transformation, 快速傅里叶变换
- FHI: Function Health Index, 功能健康指数
- FMEA: Failure Model and Effect Analysis, 故障模式与影响分析
- FPR: Fault Propagation Relation, 故障传播关系
- FPD: Fault Propagation Distance, 故障传播距离
- FPDI: Fault Propagation Distance Index, 故障传播距离指数
- FSM: Finite State Machine, 有限状态机
- FTA: Fault Tree Analysis, 故障树分析法
- GNC: Guidance, Navigation and Control, 导航、制导与控制
- GPS: Global Position System, 全球定位系统
- GSHM: Ground System Health Management, 地面系统健康管理
- HAZOP: Hazard and Operability Analysis, 危险和操作性分析
- HI: Health Index, 健康指数
- HUMS: Health and Usage Monitoring System, 健康与使用监控系统
- IBL: Instance-Based Learning, 基于实例学习
- ICD: Interface Control Document, 界面控制文件
- IMU: Inertial Measurement Unit, 惯性测量单元
- IO: Innovation Outlier, 革新异常
- ISHM: Integrated System Health Management, 集成系统健康管理
- ISHEM: Integrated Systems Health Engineering and Management, 集成系统健康工程与管理
- ISIS: Institute for Software-Integrated Systems, 软件集成系统研究所
- IS: Immune System, 生物免疫系统
- IVHM: Integrated Vehicle Health Management, 集成运载器健康管理
- JPL: Jet Propulsion Laboratory, 喷气推进实验室

- LVHM: Launch Vehicle Health Management, 运载火箭健康管理
- LTL: Linear Temporal Logic, 线性时序逻辑
- MAE: Mean Absolute Error, 平均绝对误差
- MAP: Most Probable Explanation, 最大可能解释
- MDL: Minimum Description Length, 最小描述长度
- ME: Mean Error, 平均误差
- MML: Minimum Message Length, 最小信息长度
- MRE: Mean Relative Error, 平均相对误差
- MTBF: Mean-Time-Between-Failure, 平均故障时间
- MUT: Mean Used Time, 平均消耗时间
- NATO: North Atlantic Treaty Organization, 北大西洋公约组织
- NASA: National Aeronautics and Space Administration, 美国国家航空航天局
- NHPP: Non-Homogeneous Poisson Process, 非齐次泊松过程
- NP: Non-deterministic Polynomial, 非确定性多项式
- OMG: Object Management Group, 对象管理组织
- OBN: Object-Oriented Bayesian Networks, 面向对象贝叶斯网络
- ORB: Object Request Broker, 对象请求代理
- PDM: Product Data Management, 产品数据管理
- PFC: Power Factor Correction, 功率因数校正
- PHM: Prognostics and Health Management, 预测与健康管理
- RAS: Reliability、Availability、Serviceability, 可靠性、可用性、可服务性
- RBHI: Reliability Based Health Index, 基于可靠度的健康指数
- RE: Relative Error, 相对误差
- RH: Reflex and Healing, 反应和修复
- RHI: Resource Health Index, 资源健康指数
- RMSE: Root Mean Square Error, 均方根误差
- RPN: Risk Priority Number, 风险优先数
- SCHM: Space Craft Health Management, 航天器健康管理
- SCS: Safety Critical Systems, 安全关键软件
- SFMEA: Software Failure Model and Effect Analysis, 软件失效模式及影响分析
- SHM: System Health Management, 系统健康管理
- SHMCM: Supporting Health Management Component Model, 支持健康管理的构件模型
- SLHM: System-Level Health Manager, 系统级健康管理
- SSE: Sum of Squares Error, 误差平方和

SSHM: Software and Sensor Health Management, 软件和传感器健康管理

SWHI: Software Health Index, 软件健康指数

SWHM: Software Health Management, 软件健康管理

TFPG: Timed Fault Propagation, 定时故障传播

TTC: Time to Critical, 临界时间

VHM: Vehicle Health Monitoring, 运载器健康监测

V&V: Verification & Validation, 验证与确认

VVIACS: Validation & Verification of Intelligent and Adaptive Control Systems, 智能自适应系统的确认&验证

CerTAFCS CPI: Certification Techniques for Advanced Flight Critical Systems Challenge Problem Integration, 先进飞行关键系统认证技术-关键问题集成

MCAR: Mixed Criticality Architecture Requirements, 混合关键架构需求

CONTENTS

目录

第 1 章 软件健康管理基本内容	1
1.1 软件健康管理发展起源	1
1.1.1 健康管理技术发展历程	1
1.1.2 软件健康管理技术发展动因	6
1.2 基本概念	9
1.2.1 软件错误、软件缺陷、软件故障、软件失效和软件异常	9
1.2.2 故障诊断、失效预测	11
1.3 软件健康管理基本问题	12
1.3.1 软件健康	12
1.3.2 软件健康管理概念	12
1.3.3 与现有技术的区别及联系	14
1.4 软件健康管理涉及的关键技术	16
1.4.1 软件健康管理层次结构	16
1.4.2 基于软件传感器的实时监测	19
1.4.3 软件故障诊断	22
1.4.4 软件健康评估问题	23
1.4.5 软件异常减缓策略	24
1.5 软件健康管理发展现状	25
1.6 小结	36
第 2 章 软件故障模式分析方法	37
2.1 安全关键软件概述	37
2.1.1 安全关键软件概念	37
2.1.2 安全关键软件特点	38
2.2 故障模式分析常用方法	39
2.2.1 故障树分析法	39
2.2.2 事件树分析法	41
2.2.3 危险和操作性分析法	44
2.2.4 软件 FMEA	46
2.3 SWHM 结构化方法	52

2.3.1 方法	52
2.3.2 结果分析	53
2.4 小结	80
第3章 软件健康信息获取技术	81
3.1 软件构件技术的发展	81
3.2 典型软件构件介绍	84
3.2.1 CORBA 构件模型 (CCM)	84
3.2.2 Java Beans/EJB	85
3.2.3 COM/DCOM	86
3.2.4 模型比较	88
3.3 软件健康信号提取	89
3.4 软件异常信息获取	93
3.4.1 支持健康管理的通用软件构件模型	93
3.4.2 异常监测元模型	94
3.5 SHMCM 在航天型号软件中的应用	98
3.6 小结	101
第4章 软件性能异常检测技术	102
4.1 软件性能异常检测方法	102
4.1.1 基于统计方式的异常检测	103
4.1.2 基于人工智能的检测方法	104
4.2 基于免疫遗传的软件性能异常在线检测	106
4.2.1 数据预处理	107
4.2.2 编码和度量	107
4.2.3 检测子的产生	108
4.2.4 进化	109
4.2.5 检测	111
4.2.6 算法描述	111
4.2.7 仿真实验	112
4.3 基于 ASW-RTS 的软件性能异常在线检测	117
4.3.1 ASW-RTS 算法建模	117
4.3.2 在线检测过程及算法分析	122
4.3.3 实验验证及结果分析	124
4.4 小结	129
第5章 基于贝叶斯网络的软件健康管理技术	130
5.1 贝叶斯网络基础知识	130
5.1.1 基本概念	130
5.1.2 推理原理及算法	133

5.2 贝叶斯网络建模方法	138
5.2.1 手动建模	138
5.2.2 自动学习建模	139
5.2.3 两阶段建模	142
5.2.4 常用工具	142
5.3 面向 SWHM 的贝叶斯网络建模	143
5.3.1 节点	143
5.3.2 拓扑空间	145
5.3.3 节点状态空间	147
5.3.4 条件概率分布	147
5.3.5 软件传感器及其数据处理	149
5.4 基于贝叶斯网络的某飞行控制系统 SWHM 系统构建	152
5.4.1 飞行控制系统概述	152
5.4.2 方法步骤	154
5.4.3 系统结构	158
5.5 实例应用	160
5.5.1 具有缺陷的文件系统	160
5.5.2 信号处理故障	165
5.6 小结	169
第 6 章 基于 TFPG 推理模型的软件健康管理技术	171
6.1 相关工作	171
6.1.1 故障传播模型	171
6.1.2 故障检测	172
6.2 基于 TFPG 的故障诊断	173
6.2.1 TFPG 模型	173
6.2.2 推理算法	176
6.3 基于 TFPG 的软件健康管理	179
6.3.1 ACM 中的健康管理	179
6.3.2 TFPG 故障推理机设计	182
6.4 应用实例	190
6.4.1 周期性 Consumer 端口的通用 TFPG 模型	190
6.4.2 GPS 集合的 TFPG 模型	193
6.4.3 诊断过程	194
6.5 小结	195
第 7 章 软件健康度量方法研究实例	197
7.1 软件健康度量相关概念	197
7.1.1 软件度量	197

7.1.2 软件健康度量	199
7.2 软件健康状态划分	200
7.3 基于过程的软件健康度量参数选取	202
7.4 安全关键软件健康综合度量	204
7.4.1 基于可靠性的固有健康度量	205
7.4.2 资源健康度量	211
7.4.3 功能健康	211
7.4.4 软件健康指数计算	217
7.5 小结	218
第 8 章 软件故障修复技术研究	219
8.1 软件故障修复方法分析	219
8.2 基于软件重构的减缓技术研究	221
8.2.1 基于反应的减缓技术	221
8.2.2 基于推理搜索的减缓技术	222
8.3 基于反应和推理搜索的组合式减缓技术	229
8.3.1 组合式减缓策略可行性分析	229
8.3.2 组合式减缓策略框架	229
8.3.3 面向 SHMCM 的定时状态机	231
8.3.4 组合式减缓引擎的重构算法	234
8.4 小结	240
第 9 章 软件健康管理应用实例	241
9.1 惯性测量单元实例	241
9.1.1 GPS 子系统	242
9.1.2 ADIRU 子系统	244
9.1.3 PFC 子系统	248
9.1.4 显示子系统	248
9.1.5 生成的 TFPG 模型	249
9.1.6 系统健康管理	249
9.1.7 部署	251
9.1.8 运行	253
9.2 航天测发控软件实例	260
9.2.1 框架设计	260
9.2.2 功能构件抽取	262
9.2.3 系统实现	263
9.2.4 健康管理系统测试与分析	266
9.3 小结	269
参考文献	270

第 1 章

软件健康管理基本内容

软件健康管理作为一门新兴的学科，目前得到了国内外软件领域研究人员的关注，取得了一些成果。但是，对于涉及软件健康管理的一些基本内容，还没有进行系统的梳理和介绍。本章主要介绍软件健康管理的基本内容，并回答以下 3 个关键问题：①为什么要发展软件健康管理；②什么是软件健康管理；③如何实现软件健康管理。本章主要介绍了软件健康管理的发展动因、软件健康管理的基本概念、软件健康管理的关键技术及当前软件健康管理的发展现状。

本章在本书中起到了提纲挈领的作用，通过本章内容的介绍，能够使读者了解软件健康管理技术发展的前因后果，认识研究软件健康管理的重大意义，明确实现软件健康管理过程中的关键技术和方法，从而对软件健康管理有一个总体、宏观、清醒的认识。

1.1 软件健康管理发展起源

1.1.1 健康管理技术发展历程

健康管理技术的起源可以追溯到 20 世纪 50 年代和 60 年代。当时，航天领域极端的环境和使用条件驱动了最初的可靠性理论、环境试验和系统试验，以及质量方法的诞生。随着宇航系统复杂性的增加，由设计不充分、制造误差、维修差错和非计划事件等各种原因导致故障的机率也在增加，迫使人们在 70 年代创造出新的方法来监视系统状态，预防异常属性，导致机上关键故障响应方法的出现，如故障保护和冗余管理。在 20 世纪 70 至 80 年代，随着技术发展和系统复杂度的不断增长，逐渐形成了规范化的理论，如 Byzantine 故障理论、软件失效模式和故障树分析、基于有向图的诊断方法等，并最终带来了故障预测方法的诞生^[1]。健康管理发展中的主要事件如表 1-1 所示。

表 1-1 健康管理发展中的主要事件

时间	事件
20 世纪 50 年代	• 质量控制 • 可靠性分析、失效模式和效能分析 (Failure Model and Effect Analysis, FMEA) • 环境测试 • 系统工程
20 世纪 60 年代	• 故障树分析, 危害分析 • 系统综合测试和“寻找弱点”测试 • 硬件冗余
20 世纪 70 年代	• 可靠性为中心的维修 • 软件 FMEA 和可靠性分析 • 冗余管理, 机载故障保护 • 早期机内检测 (主要是按钮式测试或布尔测试)
20 世纪 80 年代	• Byzantine 故障理论 (1982) • 软件故障树分析, 有向图 • DoD (Department of Defence of the United States) 综合诊断 • 波音 757/767 维修控制和显示面板 • NASA (National Aeronautics and Space Administration) 和 DoD 子系统和飞行器健康监测 • 航天公司可靠性工作站 • 机内自检测设计使用指导 ARINC-604 (1988) • 诊断工作站原则 (1988) • 整体质量管理 • 波音 747-400 中央维护计算机
20 世纪 90 年代	• 视情维修 • 系统健康管理设计方法论 (1992) • 可靠性: 基本概念和术语 (1992) • 机载维护系统设计指导 ARTNC-624 (1993) • 波音 777 机载维护系统 (1995) • (综合) 系统健康管理 • 有向图应用于国际空间站 • 可操作的 SHM (System Health Management) 控制回路理念 (1995) • SHM 诊断技术、传感器技术和预测 • 双向安全性分析, 概率风险评估

(续表)

时间	事件
21 世纪前 10 年	• 哥伦比亚事故调查委员会报告 (2003) • 空军研究实验室 ISHM(Integrated System Health Management)协会建立 (2004) • 综合系统健康工程和管理论坛 (2005) • 预测与健康会议 (2008) • 国际预测与健康管理学报 (2009) • 建立预测与健康协会 (2009) • NASA 将软件健康管理列为 IVHM (Integrated Vehicle Health Management) 四大研究方向之一 (2009) • 第一届软件健康管理国际研讨会 (2009)
2010 年至今	• 第二届软件健康管理国际研讨会 (2011)

美国是最早开展健康管理技术研究与应用的国家,美国健康管理技术应用的两种典型代表是洛克希德-马丁公司提出的预测与健康 (Prognostics and Health Management, PHM) 和 NASA、波音、霍尼维尔等研究单位提出的集成运载器健康管理 (Integrated Vehicle Health Management, IVHM)。

健康管理首先应用于军用飞机上,较早出现的军用直升机健康与使用监控系统 (Health and Usage Monitoring System, HUMS) 是 PHM 的前身。美国陆军的直升机已有 180 多架安装了 HUMS 系统,包括 AH-64 “阿帕奇”、UH-60 “黑鹰”和 CH-47 “支奴干”,安装了 HUMS 系统的直升机,任务完成率明显提高。以黑鹰直升机 HUMS 为例,系统由机载部分和地面部分构成,机载部分包括多个传感器及与传感器相连的中心记录系统,负责在飞行中采集与机上各分系统和部件相关的大量数据,记录整机与各构件的状态,以及直升机已执行的各类操作;地面部分包括地面数据分析、表示与记录系统。每隔一段时间,将机载测试数据下载到地面计算机进行深入分析,确定直升机各系统的健康状况、使用状态及状态发展趋势,对定检期间可能发生的故障进行预警,预先安排直升机降落时间和维护资源。20 世纪 90 年代末,随着美军重大项目 F-35 联合攻击战斗机项目的启动,为预测与健康技术的诞生带来了契机。PHM 是 JSF 项目实现经济承受性、保障性和生存性目标的一个关键所在。在 JSF 中应用 PHM 系统的目的是减少维修人力、增加出动架次率、实现自主式保障。采用 PHM 技术的 F-35 飞机,保障设备将减少 50%,维护人员减少 20%~40%,架次生成率增加 25%。具体到地面保障设备,F-35 的保障设备洛马之星与 F-16 的保障设备相比规模小很多,F-16 的保障设备在基地级至少有 6 种类型,而洛马之星仅有基本型、光电、射频 3 种类型;从人力和后勤基础设施上比较,

洛马之星将比 F-16 战斗机的保障设备减少 40%~50%。美国国防部的新一代 HUMS——Advanced HUMS 具有全面的健康管理能力和开放、灵活的架构。2007 年 3 月, 美国陆军授予智能自动化公司合同, 将其新开发的 AHUMS 引入美陆军的 RQ-7A/B “阴影” 200 战术无人机系统中。此外, 美陆军计划在全部 750 架“阿帕奇”直升机上安装 HUMS。英国国防部也与史密斯航宇公司达成协议, 为未来 70 架“山猫”直升机开发一种具备状态与使用监测系统和机舱声音与飞行数据记录仪综合能力的系统, 交付时间从 2011 年开始。另外, 史密斯航宇公司也将为韩国直升机项目提供价值超过 2000 万美元的直升机 HUMS 系统。HUMS 不但应用于直升机上, 在阵风、鹰等战斗机和 C-130 “大力神”运输机等固定翼飞机上也已经应用。2006 年, 波音公司选择泰瑞达公司为美国海军 P-8A 多任务海上飞机开发并提供与 HUMS 类似的飞机健康监测系统 (Airplane Health Monitoring System, AHMS)。

NASA 作为健康管理的权威研究机构, 首先于 20 世纪 80 年代末在 NASA 的研究机构内部提出了运载器健康监测 (Vehicle Health Monitoring, VHM), 主要是指合理选择和使用传感器与软件, 监测空间运载器的健康状况。但是后来工程师们发现 VHM 的概念存在缺陷, 单纯的监测是不够的, 因为监测的目的是采取行动, 为了体现这一活动的主动性, 随后即用“管理”一词替代了“监控”, 运载器健康监测变成了运载器健康管理 (Vehicle Health Management, VHM)。在 20 世纪 90 年代 NASA 列出的未来太空飞行一系列技术需求中, VHM 技术位列榜首。VHM 技术最初在下一代可重用运载器上应用实施, 如 X-33。VHM 系统监测并记录 X-33 的所有数据, 包括飞行总线数据、运载器健康数据 (结构、机械、系统 BIT 状态) 和所有飞行测试仪表的传感器数据。集成运载器健康管理 (Integrated Vehicle Health Management, IVHM) 是在 VHM 基础上发展而来的, IVHM 计划主要由 NASA 埃姆斯研究中心负责, 其中比较有代表性的系统是 Living Stone。Living Stone 是一种基于模型的推理系统, 具有很强的环境鲁棒性。Living Stone 最初用于 DS-1, 随后在 X-34 和 X-37 上进行了飞行试验。与 X-34 相似, 在 X-37 上进行的 IVHM 飞行试验监测电源子系统和机电驱动装置, 软件运行在运载器管理计算机上。由于运算资源有限, 对 IVHM 软件的实时性要求十分严格, 要求仅占 CPU 整个周期的 1.5% 以内。从 20 世纪 70 年代至 20 世纪末, 美国的国防部门和各军兵种, 先后开发并应用了飞机状态监测系统 (Aircraft Condition Monitoring System, ACMS)、发动机监测系统 (Engine Monitoring System, EMS)、自主应急管理 (Automated Contingency Management, ACM) 等一系列与健康相关的系统, 直到 20 世纪末联合攻击战斗机项目, 以及“星座”计划研制的健康管理系统, 将健康管理技术的应用提升到了一个新的高度。健康管理技术在美国航天领域的发展和应用历程简要如图 1-1 所示^[3]。