



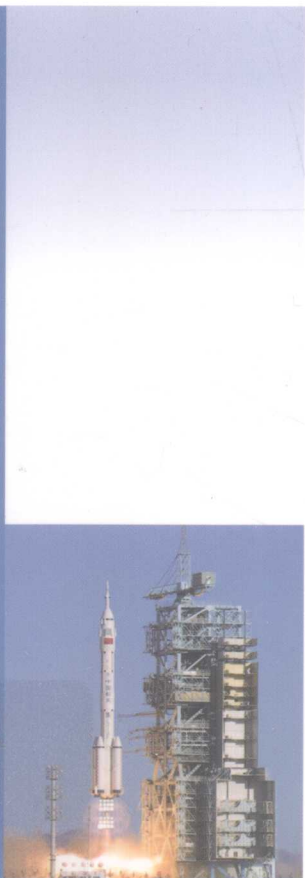
装备科技译著出版基金

Integrated Vehicle Health Management  
Perspectives on an Emerging Field

# 综合飞行器健康管理 新兴领域的应用

[英] 伊恩K.詹宁斯 (Ian K.Jennions) 主编

任占勇 主审 曾照洋 主译



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

# 综合飞行器健康管理： 新兴领域的应用

Integrated Vehicle Health Management Perspectives on  
an Emerging Field

[英] 伊恩 K. 詹宁斯 (Ian K. Jennions) 主编

任占勇 主审

曾照洋 主译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2015-039 号

图书在版编目(CIP)数据

综合飞行器健康管理:新兴领域的应用/(英)伊恩·K. 詹宁斯(Ian K. Jennions)主编;曾照洋译.  
—北京:国防工业出版社,2016.6

书名原文:Integrated Vehicle Health Management:  
Perspectives on an Emerging Field

ISBN 978-7-118-10848-4

I. ①综… II. ①伊… ②曾… III. ①飞行器—  
综合管理 IV. ①V47

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第140744号

Integrated Vehicle Health Management Perspectives on an Emerging Field by Ian K. Jennions  
ISBN 978-0-7680-6432-2

Copyright © 2011 SAE International. All rights reserved.

本书简体中文版由SAE International授权国防工业出版社独家出版。  
版权所有,侵权必究。

※

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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 13 字数 233 千字

2016年6月第1版第1次印刷 印数 1—1000册 定价 89.00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

## 致 谢

将来自多个专业领域的知识有效融合并投入到连贯的工作之中并非易事。为了在实践中达成共识并实现较好的效果,就需要投入时间、精力以及大量的沟通协调工作。

本书命名为《综合飞行器健康管理:新兴领域的应用》,由 SAE International 国际自动机工程师学会出版发行。本书的主题与内容是独特且具有开创性的,它汇聚了超过 16 名作者的观点。这些作者都是分散于世界各地的相关研究领域的专家,正是由于他们的全力支持与默契配合,本项目才能以破纪录的时间取得如此重要的突破。

在紧迫的时间面前,本书的编写团队在克兰菲尔德大学 IVHM 研究中心(英国)lan K. Jennions 教授的带领下,经受住了严峻的考验与挑战。关于发展综合飞行器健康管理技术的愿景从未消失,对此付出的努力也从未停止过;正因为存在这样的市场需求,本书应运而生。

本团队以实际行动证明了团队协作的重要性;团队成员们突出的能力、由衷的尊重和永不言弃的意志都是至关重要的影响因素。

《综合飞行器健康管理:新兴领域的应用》这本书适用于在技术和商业层面对综合飞行器健康管理感兴趣的读者,并且可以在具体案例与应用中解释相关概念和技术内涵。从概念上来说,本书的标题能够呈现出综合飞行器健康管理这一新兴领域的基础层面以及更高级层面的知识信息。

本书的作者们不仅分享了他们的研究成果,还在书中的一些非技术性章节里分享了其各自现实生活中的实践经验。在处理某些未知领域的问题时,他们的观点有时会存在不同,但是,他们的最终结论仍保持一致:综合飞行器健康管理技术应用恰当时,这将是飞行器设计领域一种非常宝贵的新范式。以下是本书的作者清单,每位作者的简介将在本书末尾处介绍。

Ashok N. Srivastava, NASA Ames 研究所中心

Assaad Krichene, Impact Technologies 有限公司

*Charlie Dibsedale*, 系统优化与解决方案 (OSyS)  
*Chris Pomfret*, Treble One 有限公司  
*Dinkar Mylarawany*, Honeywell 国际有限公司  
*Eric G. Cooper*, NASA Langley 研究中心  
*George Vachtsevanos*, 佐治亚理工学院电气与计算机工程学院  
*Ian K. Jennions*, 克兰菲尔德大学 IVHM 中心  
*Kai Goebel*, NASA Ames 研究中心  
*Louis Redding*, 克兰菲尔德大学 IVHM 中心  
*Michael J. Roemer*, Impact Technologies 有限公司  
*Paul Davies* Thales, 波音公司  
*Peter Foote*, BAE 系统公司  
*Robert W. Mah*, NASA Ames 研究中心  
*Steve Parker*, 美捷特集团  
*Timothy J. Wilmering*, 波音公司

与此同时,评论员的工作也是非常重要的,他们可以保证本书技术内容的有效、有用、易于理解。

在此,对各位评论员也表示最深切的感谢:

*Andy Hall*, 英国国防部  
*Chip Queitzsch*, 美国联邦航空管理局 FAA  
*Dave Kinney*, 波音公司  
*David Followell*, 波音公司  
*Ian Campbell*, 美捷特集团  
*Ian K. Jennions*, 克兰菲尔德大学 IVHM 中心  
*Jacek Stecki*, PHM 技术  
*Keith Jackson*, Rolls-Royce 公司  
*Kirby Keller*, 波音公司  
*Lucas Puttini*, 巴西航空工业公司 Embraer  
*Merv Flpyd*, 美捷特集团  
*Peter Foote*, BAE 系统公司  
*Rhondda Walthall*, 汉密尔顿组合公司  
*Richard Greaves*, 美捷特集团  
*Seth Kessler*, Metis 设计公司  
*Sonia Vohnout*, 美国锐拓集团公司 Ridgetop Group

我们的目标是不断推进 SAE 在综合飞行器健康管理领域研究与努力,我们相信其价值将会随着时间的推移而体现得更加明显。

同时,我们希望读者能够通过本书的标题直接接触到综合飞行器健康管理,本书的内容则可以有效支持飞行器健康管理技术的实现,并且在技术上与经济上都具备可行性。

SAE International 国际自动机工程师学会

## 译者序

随着现代武器装备复杂性、综合化、智能化程度的不断提高,由故障事件主宰的维修(即事后维修)或与时间相关的维修(即定期维修)被基于状态的维修(CBM,即视情维修)所取代。视情维修具有后勤保障规模小、经济可承受性好、自动化、高效率以及可避免重大灾难性事故等显著优势。而视情维修的实现,极大地依赖于装备可评估其自身的健康状态,并且在系统故障发生前对其故障进行预测的能力。

综合飞行器健康管理(Integrated Vehicle Health Management, IVHM)正是在此背景下提出,并逐渐致力于解决装备维修保障工作的一种解决方案。为了让更多的人了解并推广 IVHM 在武器装备的应用,任占勇、曾照洋等人多次与 SAE 协会进行技术交流,认为 Integrated Vehicle Health Management 系列丛书系统地阐述了 IVHM 技术的形成、发展及应用,翻译该系列丛书以促进 IVHM 技术在国内的普及及应用。本书为该系列丛书的第一本 Integrated Vehicle Health Management——Perspective on an Emerging Field。

全书共分为 13 章:第 1~4 章主要介绍 IVHM 的概况,包括 IVHM 概念的形成与定义,维修发展史及 IVHM 所处的角色,IVHM 相关技术文献,以及 IVHM 的商业价值等内容。在系统介绍了 IVHM 后,突出强调了 IVHM 潜在的巨大商业价值,以及未来 IVHM 在航空航天、风力发电等领域美好的发展前景。第 5~10 章主要介绍支撑 IVHM 的关键技术,包括以系统工程方式开展 IVHM 设计、IVHM 基本原理、设计实现的核心算法、设计工具与工具包、结构健康管理、飞行器级推进系统健康评估等内容,通过设计准则、设计原理、核心算法、实现工具等多个维度、多方面的系统介绍,详细介绍 IVHM 设计实现的整体过程。第 11~12 章,主要以飞行器健康管理操作间和 HMUS 为具体案例,具体说明 IVHM 工程应

用的背景、实现及应用效果。第 13 章则是总结当前 IVHM 的观点和商业模式, 展望其未来的发展以及剖析了其潜在的问题。

本书由任占勇主审, 曾照洋主译。参加编译工作的有郑积斐(第 1, 2, 13 章), 黄翠红(第 3 章), 刘丹丹(第 4 章), 宋成军(第 5 章), 苏峰(第 6, 7 章), 刘萌萌(第 8 章), 张艺琼(第 10 章), 杜熠(第 11 章), 陈忱(第 9, 12 章), 参与翻译的还有李璠、蒋觉义、宋博、王方园、彭兴月。



# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
Ian K. Jennions 克兰菲尔德大学 IVHM 中心	
1.1 背景 .....	3
1.2 定义 .....	4
1.3 技术 .....	5
1.4 商业议题 .....	6
1.5 框架 .....	7
1.6 本书结构 .....	8
<b>第 2 章 维护的发展与 IVHM 的角色</b> .....	11
Charlie Dibsdale 系统优化与解决方案(OSyS)	
2.1 为维护 and IVHM 设置背景 .....	13
2.2 维护的早期历史 .....	14
2.3 计划与预防性维护的出现 .....	15
2.4 以可靠性为中心的维护的出现 .....	15
2.5 信息革命的出现 .....	16
2.6 改变商业模式——OEM 的售后服务 .....	17
2.7 IVHM 的出现 .....	18
<b>第 3 章 IVHM 介绍——文献视角</b> .....	21
Louis Redding 克兰菲尔德大学 IVHM 中心	
3.1 IVHM 介绍及定义 .....	23
3.2 产品级的 IVHM .....	25
3.3 运行一个典型的 IVHM 系统 .....	26
3.4 IVHM 应用 .....	26
3.5 具有 IVHM 能力的后勤和库存保障 .....	28
3.6 结论 .....	29

<b>第 4 章 IVHM 的商业价值</b> .....	31
Chris Pomfret Treble One 有限公司	
Ian K. Jennions 克兰菲尔德大学 IVHM 中心	
Charlie Dibsdale 系统优化与解决方案(OSyS)	
4.1 简介 .....	33
4.2 安装 IVHM 系统的动机 .....	33
4.3 IVHM 系统的效益 .....	38
4.4 建立费效分析来保证执行的合理性 .....	42
4.5 成功案例 .....	44
4.6 IVHM 运行的挑战 .....	45
<b>第 5 章 健康管理系统工程</b> .....	47
Timothy J. Wilmering 波音公司	
Paul Davies Thales 泰雷兹	
5.1 概述 .....	49
5.2 系统准则在健康管理中的应用 .....	49
5.3 系统工程、任务成功性和健康管理 .....	52
5.4 综合飞行器健康管理系统的寿命周期 .....	53
5.5 评估健康管理系统的的影响 .....	59
5.6 感谢 .....	60
<b>第 6 章 基本原理</b> .....	63
George Vachtsevanos 佐治亚理工学院电气与计算机工程学院	
Kai Goebel NASA Ames 研究中心	
6.1 简介 .....	65
6.2 OSA-CBM 框架 .....	65
6.3 综合 IVHM 架构 .....	66
6.4 感应和数据处理 .....	68
6.5 诊断和预测 .....	72
6.6 性能标准 .....	72
6.7 数据库管理 .....	72
6.8 总结 .....	73
<b>第 7 章 算法及其对综合飞行器健康管理的影响</b> .....	75
Kai Goebel NASA Ames 研究中心	
George Vachtsevanos 佐治亚理工学院电气与计算机工程学院	
7.1 引言 .....	77
7.2 异常状态检测 .....	78

7.3	诊断	79
7.4	预测	80
7.5	应急管理	82
7.6	总结	84
<b>第8章</b>	<b>设计工具和工具包</b>	<b>85</b>
	Assaad Krichene Impact Technologies 有限公司	
	Michael J. Roemer Impact Technologies 有限公司	
8.1	概述	87
8.2	功能和故障	87
8.3	故障模式和子系统的相互作用	88
8.4	功能架构	89
8.5	传感器的选择和布置	90
8.6	故障的可达性、诊断性及其范围分析	93
8.7	推理	94
<b>第9章</b>	<b>结构健康监测与管理</b>	<b>99</b>
	Peter Foote BAE 系统公司	
9.1	什么是结构健康监测与管理——为何需要它?	101
9.2	确保完整性的当前方法	102
9.3	结构健康监测传感器和系统	105
9.4	IVHM 背景下的 SHM	107
<b>第10章</b>	<b>飞行器级推理系统:综合系统范围数据以评估瞬时健康状态</b>	<b>111</b>
	Ashok N. Srivastava NASA Ames 研究所中心	
	Dinkar Mylarawany Honeywell 国际有限公司	
	Robert W. Mah NASA Ames 研究中心	
	Eric G. Cooper NASA Langley 研究中心	
10.1	简介	113
10.2	背景	114
10.3	飞行器级推理技术的范围	114
10.4	实际应用	118
10.5	VLRS 及其潜在安全影响:例子	120
10.6	确认与验证(V&V)相关议题	122
10.7	结论	123
<b>第11章</b>	<b>综合飞行器健康管理操作间</b>	<b>125</b>
	Charlie Dibsedale 系统优化与解决方案(OSyS)	

11.1	操作间的目的	127
11.2	资源优化	128
11.3	共享的情景意识	129
11.4	数据和数据管理的重要性	129
11.5	数据、信息和知识	133
11.6	知识、知识管理及其在 IVHM 中的重要性	134
11.7	集中与分散	136
11.8	未来发展	136
<b>第 12 章 IHUMS 以及实际应用结果: 一个来自英国的案例研究</b>		139
	Steve Parker 美捷特集团	
12.1	引言	141
12.2	背景	141
12.3	IHUMS 方法	143
12.4	机载设备	145
12.5	地面设备	148
12.6	数据处理和分析	148
12.7	服务中 IHUMS 的运行	152
12.8	HUMS 的有效性	153
12.9	未来发展趋势	154
<b>第 13 章 未来的方向和问题</b>		157
	Ian K. Jennions 克兰菲尔德大学 IVHM 中心	
<b>结语</b>		165
	Ian K. Jennions 克兰菲尔德大学 IVHM 中心	
<b>附录 缩略语和定义</b>		169
	Timothy J. Wilmering 波音公司	
<b>索引</b>		183
<b>作者简介</b>		191

# 第 1 章

## 概 述

Ian K. Jennions 克兰菲尔德大学 IVHM 中心

你不能躲在林中的角落等着别人来找你,有时你必须自己去找他们。

——小熊维尼, A. A. 米尔思.



## 1.1 背景

在2010年秋季,SAE国际成立了IVHM(Integrated Vehicle Health Management,综合飞行器健康管理)指导小组。在此之前就有成立指导小组的想法,并且反映在,在处理系统或子系统健康管理(不包含飞行器资产或飞行器机群方面综合的、全面的观点)的SAE下有很多小组:

- S-18:飞行器和系统研制和安全性评估;
- E-32:航空航天推进系统健康管理;
- G-11:可靠性、维修性/保障性和概率方法组;
- G-11 SHM:结构健康监测和管理;
- S-12:直升机动力装置;
- AS-3:光纤和应用光学;
- A-6:航空航天驱动、控制和液压驱动系统指导小组;
- AE-5:航空航天燃料、燃油和氧化剂系统指导小组。

新成立的IVHM小组为2011年10月在Toulouse的SAE航空航天技术(AeroTech)会上组织了IVHM技术环节,并且为了在会议期间通过分发IVHM相关书籍给参会者的形式,使他们迅速地了解这个新兴的领域,就有了出版IVHM书籍的想法。本书为此想法的结果。

IVHM的现代理念来源于大量的OEM(Original Equipment Manufacturer,原始设备制造商)所经历的转变:从销售产品,后期的收入依赖于备用零件收益,到销售服务,稳定的月收入可以从有效的资产维护的回报中获得。制造商商业模式的这种转变被[Vandermerwe and Rada 1988]称为服务化(Servitization),被其他人[Tukker and Tischner 2006; Baines et al. 2007]称为PSS(Product Service System,产品服务系统)。IVHM是确保其以高效、成本有效的方式运行的基础技术。图1.1[Tukker and Tischner, eds. 2006]解释了该概念,它不是二分的或一个情况,而是在两极中包含许多细微的部分。

从产品角度讲,OEM出售汽车创造利润,之后从出售备用零件获得未来收益。除了建立声誉和威信来留住客户以外,OEM对车辆是如何使用的是没有真实的兴趣的。从服务角度来讲,客户使用出租车从地点A到地点B。客户对资产没有经济上的兴趣,只是为获得的服务买单。出租车公司,在一些工业案例中是OEM,对汽车是怎样使用的以及它的高效和有效的维护以最大化汽车的使用有极大的兴趣。为了监测和管理,从原始数据获得的汽车信息需求可以被IVHM满足。

Rolls-Royce公司在全服务合同(total care contract)下销售航空发动机。通



图 1.1 PSS 愿景图 (Tukker and Tischner, eds., 2006)

常是客户,而不是运营商,与 Rolls-Royce 公司签订发动机维护、维修和大修 (Maintenance, Repair and Overhaul, MRO) 的合同,并按月交付服务费用。在这样的安排下,OEM 可以利用其产品信息来对运营、风险、备件等进行统筹管理,并且在寿命性能中获取更多的产品信息。这使可用性合同成为可能,并且违约的赔偿费也非常高。

Xerox 公司是在从产品运营转型为服务运营的过程中提供了稍稍与众不同的例子。公司发现客户有大量的各种各样的复印机,但仅对 Xerox 品牌复印机的服务合同不感兴趣。因此,Xerox 公司现在为各种类型复印机提供服务合同,满足客户需求,并且在怎样实施这样的服务中遇到了巨大的挑战。

因此,推动 IVHM 价值议题是商业层面的原因。它尝试通过进入维护领域来增加或保持收益,或是与被低成本部件供应商侵蚀的市场竞争。

## 1.2 定义

IVHM 各种不同的定义会在第 3 章中介绍,但是对于有效定义,SAE IVHM 指导小组会采用:

面向全系统层面评估其他成员系统当前或将来的健康状态,并结合可用资源和使用需求可预测系统健康状态趋势的系统综合能力。

这个 IVHM 标签本身引发了一些根本性的挑战。特别是,IVHM 中的“1”在很多文献的例子中都没有。大部分宣传 IVHM 的应用都是“局部”解决方案,即



集中在监测独立部件或子系统,而不是整个飞行器。综合各种各样的功能领域,比如运行、维护,以及广泛的供应网络,常常不是解决方案的一部分。

这意味着 IVHM 具有不同的“作用”。本书体现的 IVHM 应用范围是从“被动的故障管理和诊断”到“增强的可用性、功能性和完备性”。后续也会详细阐述,前者不需要进行任何整体方面的考虑,而后者需要管理、运行过程以及任何需要的基础设施大量综合,来产生价值。达到这样的综合是个复杂的挑战。

### 1.3 技术

当前存在一些理想化的观点认为技术是支撑 IVHM 概念的基础。虽然这些技术是非常深刻的,重要的是不要忘了技术本身没有内在价值。如果它只是安装到某个部件或平台上,它并不自动产生任何收益。这些收益必须被主动管理,比如通过高层次关键性能指标(high-level key performance indicators, KPI)。从非常基础的层面上讲,必须分析视情和性能信息,并依据其进行决策。这通常需要在组织内部以及相关的供应网络内部进行深刻的变革。实现这些改变是巨大的文化挑战,特别是在强的功能井的情况下。

这不是在传达 IVHM 议题中低调处理技术的作用。概念主要被一系列部件技术支持,这些部件技术用来捕捉、传输以及态势感知和性能数据分析,不论它是来自民机机翼上的发动机,工厂里的机器,飞行中的非载人运载工具,还是战争中战场上的坦克。确实,支持 IVHM 的技术——传感器、射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、互联网协议(Internet Protocol, IP)网络、分析、规则引擎、专家系统和工作流程——和智能计算一样都在当今的信息技术(Information Technology, IT)产业中。注意,这个解释特别地包括传感器或其他数据(比如,保单数据库)、维护记录和服务日志。到目前为止,结果是可捕捉的和可搜寻到的,也是 IVHM 的一部分。

IVHM 必须在利益相关者的价值议题背景下考虑(见图 1.2),如果没有技术支撑的话,这是不可能或是商业不可行的。实现这个议题可能需要对目标对象、运载工具或其中之一的部件的健康状况进行监测。建立任何商业案例的挑战是准确地决定最终可由技术支撑的议题。之前提到的 IVHM 的不同作用是重要的不同价值议题。实现议题需要合理安排相关的过程以及关键资源。其中一个关键资源就是信息。

IVHM 技术可以实现对目标对象的状态、性能和位置等信息的收集。同时,它也方便了这些信息的传输,通常是指恶劣环境中的信息传输(比如,喷气式发动机内部或战场)。这些信息后续如何被使用是议题的核心。具备高级分析功能的预测和诊断工具能够帮助海量数据进行分类,重点标识可能有用的信息。