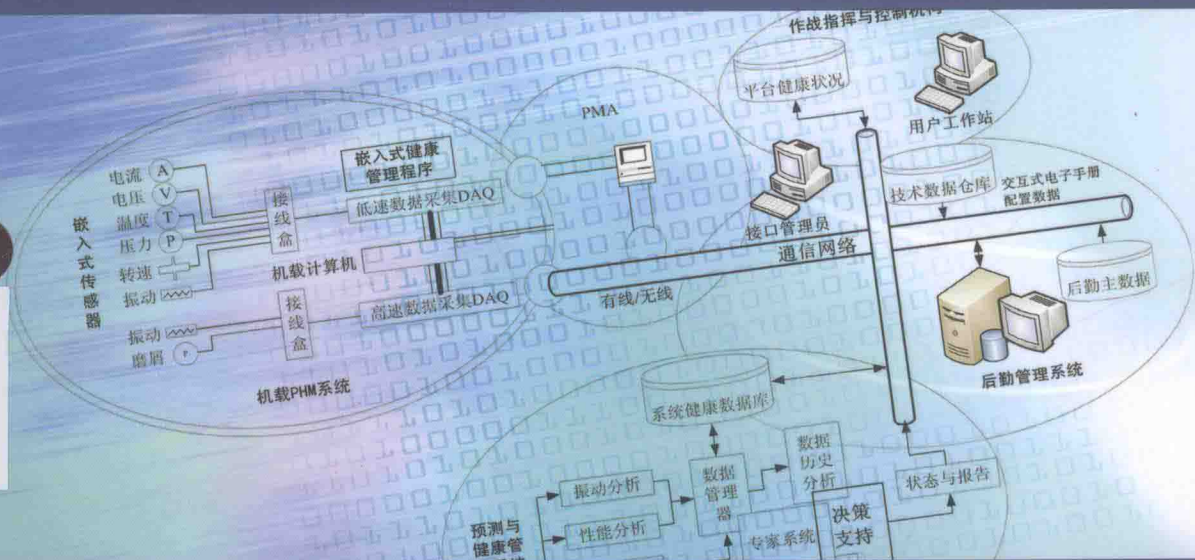




航空发动机 预测与健康管埋

Aeroengine Prognostics and Health Management

尉询楷 杨立 刘芳 战立光 冯悦 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装备部“十二五”维修预研项目资助
空军某研究所图书出版专项基金资助

航空发动机 预测与健康管理

**Aeroengine
Prognostics and Health Management**

尉询楷 杨立 刘芳 战立光 冯悦 著

国防工业出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了航空发动机预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)涉及的各种关键问题及实现技术。全书共12章:第1章介绍了PHM基本概念、航空发动机PHM研究内容、国内外现状和设计中的关键和难点问题;第2章介绍了航空发动机PHM系统要求分析、设计方法、功能架构、硬件架构等总体设计考虑因素;第3章介绍了用于航空发动机控制和健康管理的传感器;第4章介绍了PHM技术的核心实现技术——诊断、预测;第5章介绍了航空发动机PHM系统技术成熟度管理、性能验证、软硬件和维修资质认证;第6章介绍了气路、振动、滑油路PHM三项故障预测技术;第7章介绍了寿命管理、地面站两项专用健康管理技术;第8章介绍了PHM对于航空发动机维修保障的影响、PHM费效分析方法、基于PHM的航空发动机维修保障模式以及美国空军CBM+十个关键技术领域的研究项目概况;第9章介绍了F119、EJ200、F135等国外五代机发动机的典型PHM系统;第10章介绍了某型航空发动机机载监视告警改进、地面辅助检测诊断技术及设备、发动机的综合监控体系及标准,以及发动机综合监控方法的成功应用案例;第11章介绍了作者提出的国内发展军用航空发动机PHM技术对策建议和初步设计方案;第12章总结归纳了从事PHM研究的政府和研究机构、标准、国际期刊和组织、专著等方面的参考信息。

本书具有很强的针对性、实用性和指导性,可作为从事航空发动机、地面(舰船)燃气轮机预测与健康管理的专业工程技术、设计人员和管理人员的技术指导资料,也可作为高等院校航空宇航推进理论与工程、信号与信息处理、模式识别与智能系统、测试计量技术及仪器、计算机应用技术、系统工程专业的本科生、研究生进行预测与健康管理交叉研究的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机预测与健康管理/尉询楷等著. —北京:国防工业出版社,2014.1

ISBN 978-7-118-09051-2

I. ①航... II. ①尉... III. ①航空发动机—研究 IV. ①V23

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第263858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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25¼ 字数 652千字

2014年1月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价119.00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

预测与健康管理是近年来飞机发动机发展的先进技术,是确保飞行安全、降低维修保障费用的重要手段。航空发动机发达国家高度重视预测与健康管理技术的研究和应用,将其列为未来若干年重点发展的关键技术之一。目前,国外先进发动机均已配装了机载健康管理系统,形成了系列化的行业技术标准,至今已出版多部学术技术专著。与国外相比,我国在预测与健康管理技术的研究方面尚处于起步阶段。

该书作者长期致力于我国航空发动机监控及故障诊断的研究和实践,在发动机故障诊断和预测领域积累了大量经验;同时,又长期跟踪国外航空发动机预测与健康管理的学术和技术发展,结合科研实践撰写了本书。

该书较全面地总结分析了国内外在该领域的研究现状和发展趋势,包括预测与健康管理系统设计中的要求分析、经验总结和技术实现,并对其中的关键技术进行了深入阐述。该书与工程实践结合较紧密,汇集了国内外相关行业技术标准、技术报告以及应用方面的最新成果,介绍的综合监控技术已在我国的有关机种上推广应用,对于指导理论研究和工程实践具有较大参考价值。

相信该书的出版一定会为国内航空发动机预测与健康管理领域更好更快地发展注入新的活力。

甘晓华
2013.10.25

从技术手段上确保飞行安全一直是航空发达国家高度重视的重大问题,围绕发动机飞行安全开展的状态监视和故障诊断技术,从 20 世纪 50 年代开始一直持续不断发展至今,经历了由简单向复杂、由低级向高级、由离线诊断向实时监视、由单一向综合化、智能化的发展过程,从原始的目视检查到复杂、功能强大、自动化的预测与健康管理(PHM)系统。如今,配装 PHM 系统已经成为先进航空发动机的发展趋势。预测与健康管理已成为确保军用飞机飞行安全的支撑技术,并已成为先进战机发动机的重要标志和显著特征。

随着发动机推重比的快速提高,航空发动机的复杂程度和信息化水平不断提高,依靠传统的维修理念、模式和手段难以准确快速地预测、定位并修复故障,维修效率和效益也无法得到保证。当前航空发动机维修保障费用几乎占到整个寿命周期费用的近 70%,除了安全性指标之外,经济可承受性已成为航空装备发展中不可忽视的重要因素和重要评价指标之一。

为减少维修保障费用,提高航空动力装置的经济可承受性,从 20 世纪 80 年代后期开始,美军就已经卓有成效地开展了维修保障模式改革的研究和应用工作,并在多用途先进航空涡轮发动机计划(VAATE,2005—2017)中提出了减少维修费用 60% 的总目标,其中以诊断和预测为标志的航空发动机 PHM 技术是最主要的实现途径,即通过预测部件寿命预防部件失效、对部件进行延寿,减少非计划内换发即增加非计划内换发平均间隔时间 75%,通过先进的诊断技术提高排故的效率,减少单位维修操作的工作量 50%。美军应用预测与健康管理技术后,F135 五代机发动机排故时间从 F119 发动机的 20min 缩短到 15min,比现役的 F110、F100 等发动机排故时间缩短 94%,显著提高了发动机维修性和装备可利用率。预测与健康管理技术已成为减少维修保障费用,推行增强型视情维修、智能维修、自主维修、基于性能的维修等新型维修保障模式的支撑技术。

我国航空发动机走过了从引进、测仿到自主研制的艰难发展历程,虽然已经明确提出将航空发动机预测与健康管理列为需重点解决的关键技术,但是由于长期以来,只重视发动机可靠性问题,忽略预测与健康管理技术的同步协调发展,国内在航空发动机预测与健康管理领域几乎没有积累,发动机服役后暴露出很多问题,影响了飞机的飞行安全。从用户角度看,由于发动机使用和管理长期沿用定时维修模式,加上航空发动机预测与健康管理概念新、技术复杂度高,用户对其概念及其对飞行安全和维修保障的作用意义缺乏深入了解和认识。从设计、制造修理角度看,不管是整机还是关键的部附件,都需要在设计时就从诊断、预测角度提出附加的考虑因素。从科研院所、高等院校角度看,国内研究力量还比较分散,缺乏成系统的整合应用。国内航空发动机预测与健康管理现状基本可用“理论与实践分离”、“地面与空中分离”、“设计与使用分离”描述。因此,从航空发动机军方用户、监管机构,研究院校、设计所、研究所、制造修理厂、成附件厂角度看,迫切需要一部专门介绍航空发动机预测与健康管理基本概念、内容、方法体系和技术实现的参考书。

本书是一部系统介绍航空发动机预测与健康管理技术的研究著作,在撰写过程中,力求突出重点,在作者长期研究积累的基础上,消化吸收国内外航空发动机预测与健康管理系统的技术进展、行

业标准和研究报告,分析了航空发动机预测与健康管理系统设计中需重点把握的技术问题。

作者长期从事航空发动机预测与健康管理工作,承担了总装备部、空军以及设计部门的相关课题,开展了大量卓有成效的预先和应用研究,取得了丰硕的研究成果。承担完成的“某飞机‘CO’危险信号虚警隔离系统研制与应用”项目,获军队科技进步一等奖,“某系列发动机监控方法和体系研究”、“某系列发动机滑油系统综合治理”、“某飞机发动机和综合调节器检查仪”项目,获军队科技进步二等奖,这些项目创新提出了虚警隔离、机载振动告警改进、振动图谱、滑油铁谱等多项监视新技术,研制了多型机载监视装置和地面辅助检测设备,并已在三代机新机部队推广应用,制定了“某系列航空发动机综合监控实施办法”,颁布了 GJB 7079—2010《航空发动机外场质量监控通用要求》,为确保外场飞行安全做出了突出贡献。承担完成的“航空发动机故障诊断与预测的统计学习理论和方法研究”理论研究项目,提出了覆盖机器学习、支持向量机、核多元统计为代表的诊断和预测新方法,获得 2012 年度航空学会科学技术奖三等奖,在航空学报、航空动力学报、*Neurocomputing* 等国内外权威期刊发表论文 50 余篇,他引 200 余次。

全书围绕航空发动机预测与健康管理工作主线,介绍了作者和国内外航空发动机预测与健康管理的最新研究成果,具有很强的前瞻性和参考性。内容涵盖了航空发动机预测与健康管理系统设计中要求分析、架构、技术成熟度、认证、地面站、关键技术、验证方法、费效分析、维修保障等难点和关键点,分析了航空发动机预测与健康管理系统设计中需重点把握的技术问题和需认真汲取的经验教训。本书具有如下鲜明特点:

对象明确,所有内容围绕航空发动机预测与健康管理工作主题;

内容全面,基本涵盖了系统自身设计以及实现健康管理功能的技术关键点和要求;

针对性强,所选内容都是发动机预测与健康管理系统中的关键技术问题;

实用性、指导性、权威性强,关键技术的规定和要求参考了相关的行业标准,介绍的综合监控技术已在外场推广应用;

贴近国情,详细介绍了国外航空发动机预测与健康管理系统应用概况,结合我国实际提出了适合我国航空发动机预测与健康管理工作技术的发展策略和初步方案;

参考性强,书中参考资料涵盖了航空发动机 PHM 的行业标准、技术报告、期刊、会议文章和研究著作等。

本书共 12 章,第 1 章至第 8 章由尉询楷完成,第 9 章由战立光完成,第 10 章由杨立完成,第 11 章由刘芳完成,第 12 章由冯悦完成,全书由尉询楷、杨立统稿。在本书撰写过程中,作者参考了 ISO、SAE、ASTM、AIAA、ASME、IEEE、MIMOSA 等国际标准组织发布的大量相关标准,还参考了国内外同行的大量优秀研究著作和技术文章,这些都列在参考文献中,在此向这些组织和同行表示衷心的感谢。

本书具有很强的针对性和实用性,可作为从事航空发动机预测与健康管理的专业工程技术、设计人员、管理人员以及高等院校、科研院所相关专业的技术参考资料。

本书的出版得到总装备部“十二五”维修预研项目、空军某研究所图书出版专项基金资助,谨表致谢。

在书稿完成过程中,中国工程院甘晓华院士、高金吉院士,空军工程大学李应红教授,北京航空航天大学康锐教授,清华大学朱纪洪教授,以及作者的同事梅文华、薛洪涛、任光明、宋志平、赵雪红、陈锐等提出了很多建设性的意见和建议,在此表示衷心的感谢,特别感谢甘晓华院士百忙之中为本书作序。本书相当一部分章节是尉询楷在清华大学计算机系博士后科研流动站工作期间完成的,感

谢清华大学智能技术与系统国家重点实验室诸位老师给予的鼓励,特别感谢朱纪洪教授的关心和帮助。最后,特别感谢国防工业出版社冯晨编辑在本书出版过程中付出的辛勤劳动。

由于航空发动机预测与健康管理的是一门新兴的综合性技术,涉及到航空宇航推进理论与工程、信号与信息处理、模式识别与智能系统、测试计量技术及仪器、计算机应用技术、系统工程等多个交叉学科和领域,随着这些领域技术的发展进步,预测与健康管理的也日新月异。由于作者水平有限,书中必有不妥之处,殷切恳请读者批评指正。

作者
2012 年 12 月

第 1 章 绪论	001	2.2 设计方法	052
1.1 基本概念	001	2.2.1 基于可靠性分析的 设计方法	052
1.1.1 预测与健康管理	001	2.2.2 规范化设计方法	053
1.1.2 发动机故障分类	002	2.2.3 基于功能的设计方法	053
1.1.3 战术技术指标	003	2.2.4 功能失效和风险分析	054
1.1.4 指标间关系	003	2.2.5 系统测试性设计	054
1.2 航空发动机 PHM 研究内容	005	2.2.6 系统分析和优化	055
1.2.1 军用涡扇发动机简介	005	2.3 功能架构	057
1.2.2 航空发动机典型故障	006	2.3.1 基本原理	057
1.2.3 航空发动机 PHM 设计 指导思想	009	2.3.2 发动机机载健康管理	059
1.2.4 航空发动机 PHM 研究体系 与方法	010	2.3.3 工作状态	060
1.3 航空发动机 PHM 技术现状	027	2.3.4 计算主体	061
1.3.1 航空发动机 PHM 技术 背景	027	2.3.5 软件	061
1.3.2 国内外研究现状	031	2.3.6 机载模型	062
1.3.3 航空发动机 PHM 技术 挑战	034	2.3.7 部件寿命使用估计	063
1.4 本书章节安排	037	2.3.8 发动机健康管理系统 设计	063
参考文献	038	2.3.9 支持分层设计	065
第 2 章 总体设计考虑	042	2.4 硬件架构	065
2.1 用户要求分析	042	2.4.1 系统架构部件	065
2.1.1 航空发动机健康管理 用户	042	2.4.2 系统架构特性	067
2.1.2 航空发动机健康管理系统 设计流程	043	2.4.3 系统架构高级概念	071
2.1.3 用户要求与战术技术 指标	044	参考文献	071
2.1.4 诊断指标体系	046	第 3 章 传感器	074
2.1.5 预测指标体系	049	3.1 传感器通用要求	074
		3.2 主动控制传感器要求	076
		3.2.1 主动进气道流动和噪声 控制	077
		3.2.2 主动风扇和压气机 控制	078
		3.2.3 主动燃烧控制	079

3.2.4	主动涡轮控制	080	5.1.2	概念回顾	140
3.2.5	主动喷管控制	081	5.1.3	特殊需求	141
3.3	智能控制和健康管用		5.1.4	缓解方法	143
	传感器要求	083	5.1.5	健康管理 TRL	144
3.3.1	分布式控制	084	5.1.6	技术成熟案例	145
3.3.2	机载状态监视	086	5.2	验证与可靠性	147
3.3.3	技术挑战和传感器		5.2.1	可靠性和有效性要求	148
	需求	086	5.2.2	设计和开发工作	149
3.4	传感技术现状	087	5.2.3	验证活动	159
3.4.1	传感原理	087	5.2.4	进入服役	161
3.4.2	传感器现状	088	5.2.5	保障和成熟	162
3.5	新型传感技术和发展路线图	095	5.3	系统认证与维修资质	162
3.5.1	新型传感原理	096	5.3.1	耐久性	163
3.5.2	新型传感器	098	5.3.2	机械设计	165
3.5.3	未来传感器发展路		5.3.3	可靠性和长寿命	166
	线图	104	5.3.4	软件和硬件认证	166
3.6	传感器列装前需考虑的问题	106	5.3.5	适航认证	166
3.6.1	性能因素	107	5.3.6	发动机 EHM 软件认证	
3.6.2	物理因素	107		案例	167
3.6.3	环境因素	107	5.3.7	HUMS 维修资质认证	
3.6.4	安全性和可靠性因素	107		案例	171
3.6.5	支持分层设计	107	参考文献		174
3.6.6	经验教训	108	第 6 章	专用故障预测技术	176
3.7	传感器选择方法	108	6.1	气路 PHM 技术	176
参考文献		110	6.1.1	气路 PHM 原理和概况	176
第 4 章	诊断与预测	111	6.1.2	气路 PHM 总体架构	177
4.1	诊断	111	6.1.3	实时机载自调整模型	183
4.1.1	诊断框架	112	6.1.4	基于模型的气路 PHM 应用	
4.1.2	历史数据诊断法	115		技术	190
4.1.3	数据驱动法	117	6.2	振动 PHM 技术	192
4.1.4	专家系统法	126	6.2.1	振动 PHM 功能	192
4.2	预测	132	6.2.2	振动监视系统设计	193
4.2.1	故障预测优势	132	6.2.3	振动分析(用于维修)	199
4.2.2	故障预测要求	132	6.2.4	转子配平	202
4.2.3	预测方法	132	6.2.5	轴承振动监视	208
参考文献		136	6.2.6	责任分工	210
第 5 章	技术成熟度、验证与认证	139	6.2.7	法规要求	211
5.1	技术成熟度	139	6.2.8	人因	212
5.1.1	概况	139	6.2.9	经济性	212
			6.2.10	使用	213

6.2.11	维修效益	213	8.1.2	PHM 对航空发动机保障模式 的影响	273
6.2.12	推荐经验	214	8.2	航空发动机 PHM 费效分析	274
6.3	滑油 PHM 技术	214	8.2.1	费效分析概念	274
6.3.1	滑油 PHM 技术分类	215	8.2.2	费效分析考虑因素	275
6.3.2	一般要求	215	8.2.3	输入数据	277
6.3.3	滑油系统性能监视	217	8.2.4	航空发动机 PHM 费效 分析模型	277
6.3.4	滑油碎屑监视	218	8.2.5	A-10 TEMS 费效分析 案例	281
6.3.5	滑油状态监视	236	8.3	基于 PHM 的航空发动机维修 保障	286
6.3.6	效益	237	8.3.1	航空装备故障寿命 特点	287
参考文献		238	8.3.2	航空发动机维修策略	288
第 7 章	专用健康管理技术	241	8.3.3	基于 PHM 的航空发动机维修 保障策略	292
7.1	寿命管理	241	8.4	美国空军 CBM + 支撑技术和 典型项目	294
7.1.1	概述	242	8.4.1	预测领域	294
7.1.2	部件分类和控制要求	242	8.4.2	诊断领域	295
7.1.3	限寿部件失效原因	243	8.4.3	便携式维修助手	297
7.1.4	发动机寿命预测和 使用测量	244	8.4.4	交互式电子技术手册	298
7.1.5	方法验证	250	8.4.5	交互式训练领域	300
7.1.6	部件寿命使用数据 管理	251	8.4.6	数据分析领域	300
7.1.7	效益	253	8.4.7	综合信息系统领域	302
7.1.8	典型寿命监视系统	254	8.4.8	自动识别技术领域	303
7.2	地面站	258	8.4.9	以可靠性为中心的 维修工具	305
7.2.1	总体考虑	259	8.4.10	联合总资产可视化	305
7.2.2	系统功能要求	259	参考文献		306
7.2.3	输入数据	261	第 9 章	典型航空发动机 PHM 系统 案例	308
7.2.4	数据库管理系统	264	9.1	F119 发动机 PHM 系统	308
7.2.5	输出数据要求	265	9.1.1	机上典型功能	308
7.2.6	高级功能	266	9.1.2	地面支持保障系统	310
7.2.7	用户考虑因素	267	9.2	EJ200 发动机 PHM 系统	310
7.2.8	系统开发考虑因素	268	9.2.1	机载系统结构和功能	311
参考文献		271	9.2.2	地面 EHM 系统结构	312
第 8 章	基于 PHM 的航空发动机维修 保障	272			
8.1	PHM 对航空发动机维修保障 模式的影响	272			
8.1.1	PHM 对于航空发动机维修 的影响	272			

9.3	F135 发动机区域 PHM 系统	313
9.3.1	机载 PHAM 典型功能	315
9.3.2	地面 PHM 支持保障系统	315
9.4	典型发动机健康管理系统的特点	315
	参考文献	317
第 10 章	航空发动机综合监控方法及外场应用	318
10.1	机载监视告警系统及改进研究	318
10.1.1	发动机机载告警信号的设计机理	319
10.1.2	隔离“减小转速”虚警信号	321
10.1.3	改进发动机振动监视告警	323
10.2	地面辅助检测诊断技术及设备	325
10.2.1	发动机及综合调节器检查仪	325
10.2.2	瓦吉姆轴承振动检查仪	328
10.2.3	滑油磨粒检测设备及技术	329
10.2.4	发动机综合监控软件	331
10.3	航空发动机综合监控体系及标准	338
10.3.1	综合监控体系	338
10.3.2	重要参数监控方法和标准	339
10.4	综合监控效果及典型案例	344
10.4.1	滑油滤、磁塞和金属屑信号器	345
10.4.2	滑油磨粒监控	346
10.4.3	滑油消耗量大	348
10.4.4	滑油压力异常	349
10.4.5	振动异常	350
10.4.6	轴承检查	353

10.4.7	起动油压差	355
	参考文献	356

第 11 章 航空发动机 PHM 初步设计

11.1	PHM 发展策略	357
11.1.1	突出军事需求牵引	357
11.1.2	推进、建立技术成熟度综合评估体系	358
11.1.3	立足三代机发动机发展 PHM 技术	358
11.1.4	在发动机全寿命期引入 PHM 系统	359
11.2	PHM 需重点关注的因素	360
11.2.1	总体架构的考虑	360
11.2.2	功能设置的考虑	360
11.3	PHM 关键技术	361
11.3.1	几种典型 PHM 专用传感器技术	361
11.3.2	发动机整机振动监视技术	361
11.3.3	滑油碎屑早期故障监视技术	361
11.3.4	发动机实时机载自调整模型技术	362
11.3.5	关键部件早期故障融合检测技术	362
11.3.6	FMECA 分析技术	362
11.3.7	技术验证与确认 V&V 技术	362
11.3.8	系统集成关键技术	363
11.3.9	故障预测技术	363
11.4	航空发动机 PHM 初步设计	364
11.4.1	总体构成	364
11.4.2	机载健康管理系统	365
11.4.3	地面支持保障系统	369
	参考文献	370

第 12 章 附录

12.1	PHM 研究机构	373
12.1.1	学术团体	373

12.1.2	商业公司	374	12.2.5	ANSI 标准	381
12.1.3	传感器制造商	375	12.2.6	RTCA 标准	382
12.1.4	政府机构	376	12.2.7	ARINC 标准	382
12.1.5	大学	376	12.2.8	IEEE 标准	382
12.2	PHM 相关标准	377	12.3	PHM 国际期刊和国际会议	383
12.2.1	SAE 标准	377	12.3.1	国际期刊	383
12.2.2	ISO 标准	379	12.3.2	国际会议	384
12.2.3	AIAA 标准	381	12.4	PHM 研究专著	385
12.2.4	MIMOSA 标准	381			

第 1 章

绪 论

预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)作为一门新兴的、多领域的综合性技术,具有典型的军事需求牵引,从 20 世纪 50 年代开始在军用航空发动机上应用,到美军五代机 F35 整机应用、发展较为完善,目前已经从战斗机发动机扩展到了飞机整机、海军大型舰船、陆军直升机、地面装甲车辆以及工业领域的大型、重要设备中,并且以此作为支撑技术正在引领全球范围内新一轮军事领域内维修保障体制和工业领域内物流配送模式的重大变革。

本章主要就书中涉及的 PHM 基本概念、航空发动机 PHM 研究内容、国内外现状和设计中的关键和难点问题进行了介绍。1.1 节首先介绍了 PHM 的基本概念、PHM 角度的航空发动机故障分类、PHM 的典型战术技术指标以及战术技术指标之间的逻辑关系。1.2 节重点介绍航空发动机 PHM 的研究内容,首先简要介绍了典型军用小涵道比涡扇发动机的结构组成,综述了常见的典型故障及其监视技术需求,介绍了航空发动机 PHM 系统设计的指导思想,并从典型 PHM 系统组成、一般设计过程、PHM 架构以及标准化等方面详细介绍了航空发动机 PHM 的研究体系与方法。1.3 节首先介绍了航空发动机 PHM 技术的背景、国内外技术现状,并着重从不确定性、寿命管理、振动分析、气路分析、验证与确认等方面等较为客观地阐述了航空发动机 PHM 面临的重大技术挑战。1.4 节给出了本书的章节安排。

1.1 基本概念

1.1.1 预测与健康管理

1. 预测与健康管理

美军 JSF 项目办公室 Andrew Hess 首次较为系统地给出了预测与健康管理的概念^[1]。预测与健康管理(PHM)包括增强诊断、预测和健康管理的 3 部分内容。

增强诊断:以高故障诊断能力和非常低的虚警率确定部件完成其功能状态的过程。

预测:指的是对于实际材料状态的评估,包括通过故障传播建模预测并确定部件的有用寿命和剩余的性能寿命。

健康管理:根据诊断/预测信息、可用资源和使用要求对维修和后勤活动做出智能化、有见地、适

当决策的能力。

2. PHM 目标

PHM 目标包括:提高武器装备的任务可靠性和安全性;减少维修人力、备件和修理费用;取消计划性检查;实现维修和零备件采购时机最佳化;自动隔离故障到 1 个或多个外场可更换部件(LRU);消除 CNDs 和 RTOKs;实时通报装备各级保障链即将来临的维修事件;在潜在的灾难性失效发生前及时捕获;检测初始故障并监测,直到失效前;适时维修缩短装备停机时间。

3. PHM 内涵

PHM 组成功能和过程主要包括:故障检测、故障隔离、先进诊断、预测、剩余有用寿命预测、部件寿命跟踪、性能降级趋势、虚警缓解、保修期跟踪、选择性故障报告、只给飞行员通报最紧迫信息、将其余信息通报维修人员、辅助决策支持和资源管理、故障适应、信息融合和推理机、信息管理(在正确的时间将正确的信息通报给正确的人员,即 Right info to right people at right time, 3R)。PHM 代表了一种方法的转变^[2],即从传统的基于传感器的诊断转向基于智能系统的预测,反应式的通信转向在准确时间对准确的部位进行准确维修的先导式活动。其目的是减少维修人力、增加出动架次、实现自主式保障。这种转变引入了故障预测能力,借助这种能力可以预测、识别和管理故障的发生。PHM 技术的核心是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 BIT 测试和状态监控技术的进一步拓展。PHM 技术的迅速发展导致了维修和保障模式从状态监控向状态管理的转变^[3,4],该技术的实现将使由事件主宰的维修(即事后维修)或时间相关的维修(即定期维修)被基于状态的维修(即视情维修)所取代。

1.1.2 发动机故障分类

为明确健康管理系统覆盖的故障集合,给出如下发动机故障集合的定义。

(1) 发动机故障集合:指的是发动机所有故障的一个合集。故障合集一般由 FMECA 或 FMMEA 分析得到。

(2) 可检测故障集合:指的是通过 BIT、FADEC、发动机机载健康管理系统和地面支持系统能够检测到的故障子集。

(3) 可隔离故障集合:指的是通过 BIT、FADEC、发动机机载健康管理系统和地面支持系统隔离到 1 个(或至多 3 个)外场可更换部件的故障子集。

(4) 可跟踪故障集合:指的是可以通过健康管理系统或地面支持系统跟踪或进行趋势分析检测到的故障子集。

(5) 可预测故障集合:指的是可以通过跟踪、趋势分析或物理失效模型预测故障发生的故障子集。

其中,发动机各种故障集合之间关系如图 1-1 所示。

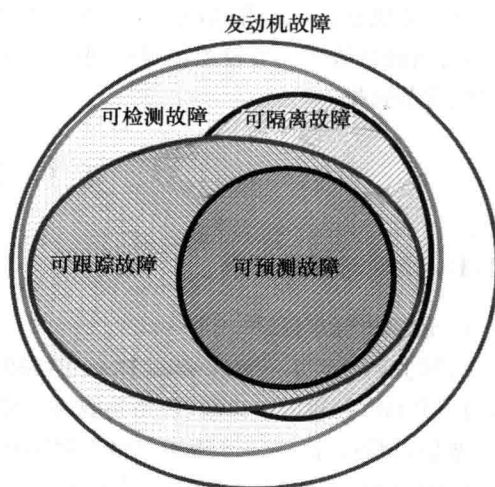


图 1-1 发动机故障集合逻辑关系

1.1.3 战术技术指标

与发动机健康管理系统相关的战术技术指标主要有如下8类^[5],其中失效率针对的是发动机健康管理系统自身,虚警率、故障检测率以及故障隔离率则是针对健康管理系统性能,平均故障诊断时间主要针对健康管理系统的维修功用,非计划内换发率、空中停车率和任务放弃率则主要针对因健康管理系统效能对维修和军机战术技术指标的影响。各种指标详细定义如下:

(1) 健康管理系统失效率(Failure Rate, FR)指的是健康管理系统本身因部件或系统失效不能执行正常功能的比率,通常以每千发动机飞行小时的失效事件次数或以平均故障间隔时间进行表征。

(2) 虚警率(False Alarm Rate, FAR)指的是健康管理系统虚报发动机故障事件的比率,通常以虚警占整个检测事件的百分比或根据发动机飞行小时给出的真实虚警比率。

(3) 故障检测率(Fault Detection Rate, FDR)指的是可由健康管理系统覆盖范围内能够检测到的故障占总故障的比率。

(4) 故障隔离率(Fault Isolation Rate, FIR)指的是健康管理系统能够将故障隔离到单(多)个部件或模块的故障数占发动机或部件故障总数的比率。一般故障隔离可以要求隔离到1个部件,或者2~3个特定部件范围。

(5) 平均诊断时间(Mean Time To Diagnose, MTTD)指的是针对健康管理系统范围内的部件故障平均失效率与维修人员隔离、诊断故障征兆所需时间的加权平均,通常以分钟表征。

(6) 非计划内换发率(Unscheduled Engine Removal, UER)指的是因发动机引起的或非发动机引起的发动机非计划内更换,通常以每千发动机飞行小时的事件次数表征。

(7) 空中停车率(In-Flight Shutdown Rate, IFSR)指的是因飞行员、控制系统或其他原因导致飞行中发动机停车的比率,通常以每千发动机飞行小时的事件次数表征。

(8) 任务放弃率(Mission Abort Rate, MAR)指的是因发动机失效导致飞行任务终止的比率,通常以每千发动机飞行小时的事件次数表征。

除此之外,可用于健康管理的技术指标还有健康管理系统可靠度、不可复现故障率、寿命周期费用等。

1.1.4 指标间关系

在检测到故障后,健康管理系统应按照图1-2所示树状结构检测、隔离故障到可更换维修单元。设计合理的健康管理系统应当尽可能消除不可复现事件、减少虚警率并提高故障隔离率,预防发动机失效,增加非计划内换发间隔时间,同时尽可能缩短故障隔离时间,提高维修工作效率^[6]。

发动机健康管理系统的—个主要目标是为提高故障检测和隔离率收集信息。健康管理系统应当尽可能减少没有发现故障、重测良好以及不可复现等实际无故障情况下移除和返回修理的部件数,减少不必要的维修和维修引起的事件,以减少备件和部件返厂修理的费用。提高故障检测和隔离率还可以减少识别故障部件或其他异常的排故工作量,从而降低了发动机故障的诊断时间。发动机健康管理系统应重点针对出现频率高、排故复杂度高的故障提高故障隔离能力,降低排故时间。

发动机的一些部件出故障后会导致发动机空中停车和任务终止。一般而言,这些故障具有早期

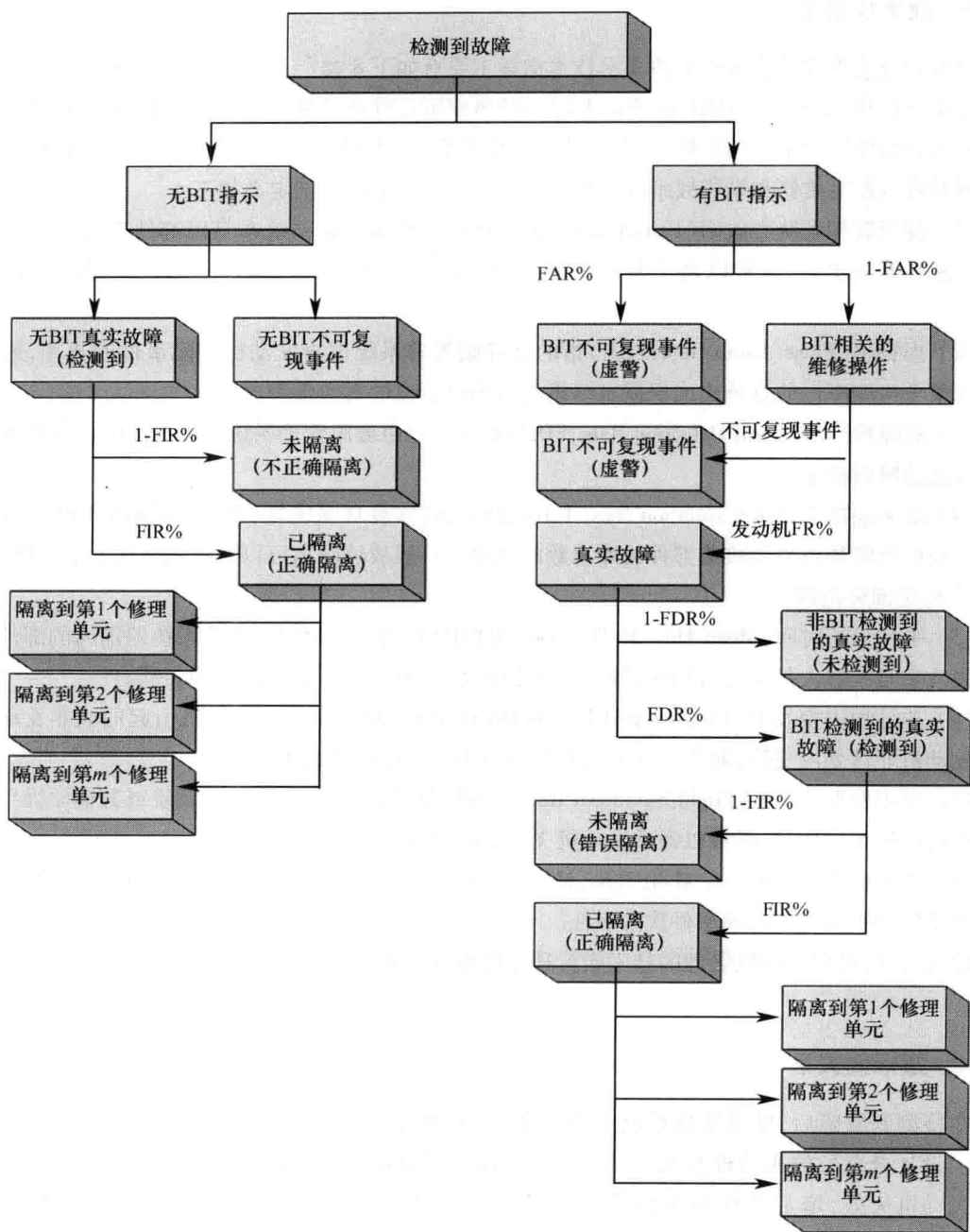


图 1-2 指标间关系

能够检测到的故障征兆,发动机健康管理系统应当通过检测早期故障征兆减少发动机空中停车和任务终止次数。此外,健康管理系统应当可以在发动机或部件失效前通过检测早期故障征兆避免发动机非计划内换发,并可以显著减少因二次损伤引起的费用。通过使用故障预测技术,可以在发动机失效前规划发动机返厂,将非计划内返厂转化为计划内返厂,并有效减少二次损伤。减少二次损伤是发动机健康管理系统降低维修成本的重要方面。通过使用寿命监视技术,在计划内减少换件,可

以使得限寿关键部件充分发挥使用潜力。此外,虚警率在健康管理系统设计时无法通过计算事先得到,只能通过列装和标准试验后才能确定。

1.2 航空发动机 PHM 研究内容

1.2.1 军用涡扇发动机简介

典型的军用涡扇发动机一般由进气道、风扇、低压压气机、高压压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮、加力燃烧室、尾喷管,以及附件传动系统、润滑系统、控制系统、发动机健康管理系统等组成^[7],如图 1-3 所示。

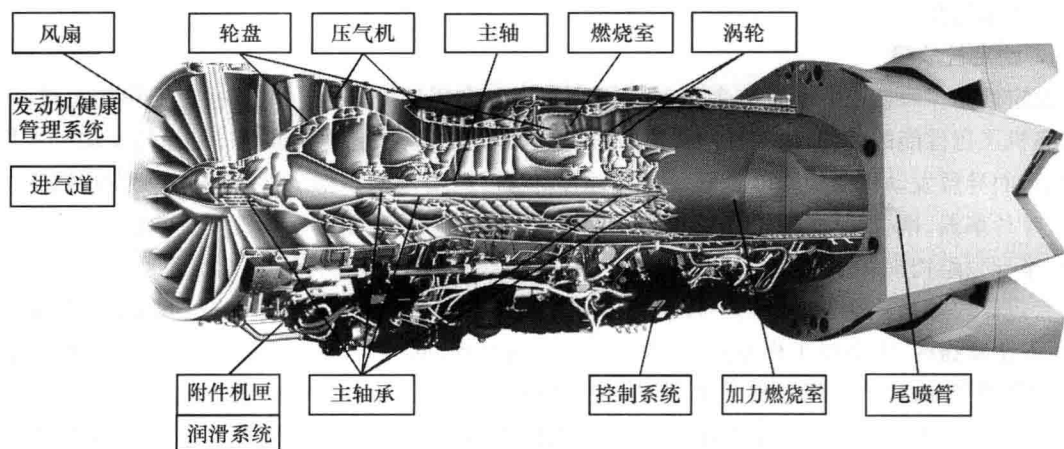


图 1-3 典型军用涡扇发动机组成

进气道一般安装在飞机上,主要功用是为发动机提供所需的空气流量,减少进口流场压力和温度畸变、激波等对发动机工作的影响。

高压压气机、燃烧室、高压涡轮构成核心机,又称为燃气发生器,用以产生高温、高压、高速燃气。高压压气机和高压涡轮组成高压转子组件,低压压气机和低压涡轮组成低压转子组件。高低压转子之间通过气动耦合平衡,确定发动机共同工作点。

附件传动系统用以从高压转子提取功率,带动发动机附件传动机匣和飞机附件机匣的附件。

润滑系统主要作用是向发动机主轴承、中央传动齿轮、附件传动机匣齿轮和轴承提供润滑和冷却的滑油,从而确保其能够正常工作。

控制系统或称为全权限数字电子控制系统(FADEC)^[8],用以控制发动机主燃烧室和加力燃烧室的燃油,在发动机飞行包线内和各种飞行条件下,控制发动机不同工作状态下的燃油流量,并控制过渡状态下的风扇进口可调叶片和高压压气机可调静子叶片、尾喷管位置,确保发动机性能在全包线范围内得到最佳的发挥。先进航空发动机一般设置双 FADEC,用以确保控制系统具有足够的冗余。

发动机 PHM 系统用以确保发动机的飞行安全,在发动机运行过程中对关键部件状态进行实时监测,对飞行中产生的异常事件进行记录和存储,用于进行事后的诊断和维修,对飞行中危及飞行安