



航空基础技术丛书

航空故障诊断与健康管理技术

AVIATION FAULT DIAGNOSIS
AND HEALTH MANAGEMENT TECHNOLOGY

上海航空测控技术研究所◎主编



航空工业出版社



航空基础技术丛书

航空故障诊断与 健康管理技术

上海航空测控技术研究所 主编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书介绍了航空故障诊断与健康管理技术的发生、发展过程；阐述了开展航空故障诊断与健康管理技术研究涉及
的策略与方法；并且，结合实例，生动地再现了故障诊断与健康管理技术在航空领域的工程应用。全书体现了理论与
实践的结合，具有很强的可读性，适合从事航空工程管理或从事航空故障诊断、预测与健康管理技术领域的，或从事
航空维修与综合保障的工程技术人员，以及高等院校相关专业师生阅读，也可供从事相关技术领域的研究人员作为参
考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

航空故障诊断与健康管理技术/上海航空测控技术
研究所主编. --北京:航空工业出版社, 2013. 12
(航空基础技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 5165 - 0300 - 3

I. ①航… II. ①上… III. ①航空设备 - 故障诊断
IV. ①V241.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 276631 号

航空故障诊断与健康管理技术
Hangkong Guzhang Zhenduan yu Jiankang Guanli Jishu

航空工业出版社出版发行
(北京市朝阳区北苑路 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936555 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2013 年 12 月第 1 版

2013 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 23

字数: 589 千字

印数: 1—3000

定价: 96.00 元

《航空基础技术丛书》总审委会

主	任	林左鸣				
常务副主任	谭瑞松					
副主	任	顾惠忠	吴献东	耿汝光	李玉海	
		张新国	高建设	李方勇	孙卫福	
成	员	关 桥	曹春晓	赵振业	李 明	刘大响
		冯培德	陈祥宝	魏金钟	刘 林	周国强
		王英杰	梁丽涛	杨胜群	曹英杰	戴圣龙
		孙侠生	张 军	赵 波	夏裕彬	张振伟
		张明习	谢富原			

《航空基础技术丛书》总编委会

主 任	徐占斌				
副主任	荣毅超	李晓红	吴世平	陈 刚	刘 鑫
成 员	向 明	梅方清	姚俊臣	周 宁	史晋蕾
	李小飞	徐 明	吴晓峰	张 力	李兴无
	杨 海	李志强	李周复	黄 蓝	刘恩朋
	轩立新	益小苏	段泽民		

《航空基础技术丛书》编写办公室

主 任	梅方清	姚俊臣			
副主任	周 宁	史晋蕾			
成 员	李小飞	郭晓月	熊昌友	郭倩旎	冯 冰
	李亚军	李少壮	杨素玲	胡律行	王湘念
	陈 玉	汪慧云	杨占才	李 冬	张 明
	姚 红				

《航空基础技术丛书》总序

近年来，以一批先进重点型号为代表的我国航空武器装备取得了“井喷式”的发展，航空工业实现了与发达国家从“望尘莫及”到“望其项背”的历史性跨越。但我们也要清醒地看到，面对新航空装备新一轮“井喷式”发展的需要，我们面临着加强航空科技创新的迫切需求。

党的十八大报告指出，要实施创新驱动发展战略，坚持走中国特色自主创新道路，以全球视野谋划和推动创新。航空工业作为高科技战略性新兴产业，在加强自主创新和提升创新能力方面面临三个方面的挑战：一是传统的技术跟随式发展模式已经走到了尽头；二是长期积累的技术创新成果已充分应用，技术储备急需创新实践来大量补充；三是新航空装备跨越式发展对技术和管理创新提出更高要求。

要实施创新驱动的发展战略，首先要注重原始创新。加大现象发现和原理验证力度，探索未知技术领域，积极寻求原创性突破，形成一批引领未来发展，技术成熟度在1~3级的创新成果。更要注重技术创新。航空基础技术作为航空科技的重要组成部分，发挥着重要的支撑作用，支持和引领着航空科技的发展。在国家科技重大专项、重点型号攻关、新型飞机和发动机的研制中都起着强有力的保障与支撑作用，具有重要的战略意义。随着我国从跟踪研制向自主创新、从制造大国到制造强国的转变，作为科技前沿的航空基础技术必将从服务和保障的方式向技术引领方式转变，并向社会其他国民经济领域进行技术转移和输出，为全社会的技术进步和创新发展起到强有力的推动作用。

中国航空工业集团公司基础技术研究院作为航空工业基础技术的龙头，肩负着支撑、引领型号发展的双重任务，本着“航空报国，强军富民”的理念，践行“变革为先，创新为本”的精神，以知识产权战略为抓手，牵引原始创新，推动技术创新，加强管理创新，最终实现从“型号牵引”到“牵引型号”的转变。

航空基础技术的传承与传播，与航空基础技术的研究与探索同样重要。目前，我们急需有关论述基础技术等科技前沿技术的专著。因此，在中国航空工业集团公司倡导下，由中国航空工业集团公司基础技术研究院组织所属 12 家单位联合编写了一套大型基础技术专著《航空基础技术丛书》。《航空基础技术丛书》的编写，开创了航空工业各专业板块之先河，为航空工业知识积累、传承、宣传工作，为航空科学技术服务于社会开了一个好头。这种勤勉探索，对航空工业、对全社会负责的精神，值得大力提倡。

该丛书的编写，对梳理航空工业基础技术的发展脉络，宣传航空基础技术成就，引领未来航空基础技术发展方向将起到重要作用，对政府主管部门、航空工业用户、其他工业领域用户了解航空基础技术提供了一个良好的媒介，对广大航空爱好者、尤其是青年人了解航空、热爱航空起到了宣传作用，亦对社会输出相关技术、服务于我国科技进步做出了贡献。

中国航空工业集团公司董事长
党组书记



2013 年 8 月

《航空基础技术丛书》总前言

我国航空工业经过六十多年的发展，逐步形成了专业门类齐全，科研、试验、生产相配套，具备研制生产当代航空装备能力的高科技工业体系，发展了多类型多用途的飞机、直升机、发动机、导弹，研制出一批具有自主知识产权并与发达国家在役航空装备性能相当的航空器，大幅度缩小了与国外先进水平的差距，使我国跻身于能够研制先进的歼击机、歼击轰炸机、直升机、教练机、特种飞机等多种航空装备的少数几个国家之列，为我国国民经济建设、国防现代化建设、社会科技进步和综合国力的提升做出了重大贡献。

航空工业作为国家的战略性产业，决定了它的发展必须建立在牢固的基础之上。所谓跨越式发展，是长期扎扎实实、厚积薄发的结果。航空基础技术作为整个航空工业的根基，在整个航空工业的发展中起着举足轻重的作用。因此，认真梳理航空基础技术发展脉络，跟踪国际航空基础技术的发展趋势，不断创新我国航空基础技术，并为航空工业新产品研制做好技术储备，成为航空工业的一项重要任务。

为完成中国航空工业集团公司基础技术研究院“打牢基础、做强技术、支撑型号、创造财富”的使命，作为中国航空工业集团公司横向价值链的最前端，基础院承担着包括政府科研、装备预研等方面的研究任务，拥有 12 家科研院所和高科技企业、多个国家工程实验室和国防科技重点实验室以及航空科技重点实验室，为国防科技工业和航空科技实现长远的跨越式发展提供了技术保障，为我国航空工业又好又快发展贡献着力量。

为强化从知识创新、技术创新到成果产业化的有效传导机制，提升航空基础研究成果产业化运作能力，充分体现基础技术在基础保障、技术引领、服务支撑等方面的作用，中国航空工业集团公司基础技术研究院（简称基础院）组织编写了《航空基础技术丛书》，全面介绍了航空

基础技术的范围、内容、现状、发展趋势等，尤其对各种技术的工程化应用特点、新技术对航空装备的影响作了重点介绍，对产品设计者提高新产品设计性能，用户提升对新产品的信任起到了较大作用。通过总结经验、探索航空基础技术发展趋势，进一步构筑和完善了相关材料、制造、标准化、计量、强度、气动、测试、雷电防护等技术体系，从而夯实航空工业发展的根基，实现航空基础技术从“型号牵引”到“牵引型号”的转型升级。

《航空基础技术丛书》分为《航空标准化与通用技术》、《航空精密超精密制造技术》、《航空计量技术》、《航空材料技术》、《航空结构强度技术》、《航空制造技术》、《航空气动力技术》、《航空故障诊断与健康管理技术》、《航空测试技术》、《航空电磁窗技术》、《航空复合材料技术》、《航空器雷电防护技术》12个分册，分别由基础院所属中国航空综合技术研究所、北京航空精密机械研究所、北京长城计量测试技术研究所、北京航空材料研究院、中国飞机强度研究所、北京航空制造工程研究所、中国航空工业空气动力研究院、上海航空测控技术研究所、北京长城航空测控技术研究所、济南特种结构研究所、中国航空工业集团公司复合材料技术中心、合肥航太电物理技术有限公司等12家科研院所和高科技企业负责编写。主编单位汇集了各个相关专业的一线科研骨干承担编写工作，由各相关专业的院士、专家负责审稿，并由各单位总工程师担任各分册编委会主任，意在全面、准确地介绍各相关专业的现状、发展趋势及应用特点。

该丛书适合航空工业相关部门、航空工业所属企事业单位，总装、空军、海军等装备需求部门，航天、兵器、船舶、核、电子等军工相关部门管理人员及相关技术人员，以及相关院校的师生等阅读。

由于航空基础技术涵盖范围甚广，相关科学技术发展很快，不足之处，还望广大读者批评指正。

中国航空工业集团公司副总经理

徐占斌

2013年8月

《航空故障诊断与健康管理技术》审委会

名誉主任 罗雪平

主 任 夏裕彬

副 主 任 蔡元友 何 泳

成 员 黄建民 佟启华 奚晓明 朱修稳 卢剑锋
胡云祥 郑 国

《航空故障诊断与健康管理技术》编委会

主 任 黄 蓝

副主任 莫固良 沈 勇 吕 琛

成 员 汪慧云 李兴旺 王景霖 何召华 翟秀梅

付海燕 徐丽清 余 静 陈乐平 刘红梅

王立梅

《航空故障诊断与健康管理技术》序

随着现代战争对武器作战效能和敏捷、准确和经济性的要求越来越高，武器装备的发展愈趋复杂化、综合化、智能化。为了持续保障武器装备满足作战的要求，故障诊断、预测与健康管理（PHM）综合技术获得世界各国越来越多的重视、发展和应用。

PHM 是对武器装备通常的机内测试（BIT）和状态（健康）监控能力的进一步发展。这种发展的主要技术特点是从状态监控向健康管理的转变，而这种转变的主要内涵是引入了预测能力。借助于这种能力就能识别和管理故障的发生、规划维修和供应保障，达到降低使用与保障费用、提高装备的安全性、战备完好性和任务成功性，实现基于状态的维修（CBM）和自主式保障。PHM 已成为新一代武器装备研制和实现自主式保障的一项核心技术，是 21 世纪提高复杂系统“五性”（可靠性、维修性、测试性、保障性和安全性）和降低使用寿命周期费用的一项非常有前途的军民两用技术。

中国航空工业集团公司上海航空测控技术研究所“八五”期间即开始了机械故障诊断技术研究，是我国较早开展故障诊断与预测技术研究的单位。该所早在 1988 年就成立中国设备管理协会设备故障诊断技术开发中心，并开展了相关的研究工作，完成了许多相关的科研项目，取得了很多成果，积累了丰富的经验。此基础上，撰写了《航空故障诊断与健康管理技术》这本书。由此书可知：中国航空工业集团公司上海航空测控技术研究所推动航空故障诊断与健康管理技术发展方面做出了重要的贡献！

该书介绍了航空故障诊断与健康管理技术的发生、发展过程；阐述了开展航空故障诊断与健康管理技术研究涉及的策略与方法；并且，结合实例，生动地再现了故障诊断与健康管理技术在航空领域的工程应

用。全书体现了理论与实践的结合，具有很强的可读性，既适合有志于该方面研究的初学者，也适合广大院校师生以及相关科研人员作为教学或科研参考用书。我相信：此书的出版对我国航空故障诊断与健康管理技术的发展、应用与推广，必将起到重要的推动作用。

南京航空航天大学教授
中国科学院院士



2013 年 5 月

《航空故障诊断与健康管理技术》前言

安全性、可靠性、维修性和可用性对现代航空器来说至关重要，而故障诊断、预测与健康管理（PHM）技术已成为提高飞机的安全性、可靠性、维修性和可用性所必须具备的能力。近年来，各国军方和工业界广泛关注 PHM 技术的发展，都在积极采取各种方式加速这类技术的研究开发和应用。无论是在美国或是在欧洲，该项技术已经应用于多种飞机、发动机或直升机型号工程，如联合攻击机（JSF）项目 F-35 战斗机、“阵风”战斗机、P-8A 多任务海上飞机、UCAV 无人飞机、UH-60 “黑鹰”直升机，等等，PHM 技术发展日渐成熟。航空故障诊断与健康管理技术涉及多学科交叉领域，虽然我国在这一领域的研究起步较晚，但是得到业界越来越多的重视，相关的基础性技术研究探索、型号工程应用研究也正广泛地和不断深入地开展中。

现代航空武器装备的采购费用和使用与保障（O&S）费用日益庞大，经济可承受性成为航空装备一个不可回避的问题。据美军综合数据分析，在武器装备的全寿命周期费用中，使用与保障费用占到了总费用的 72%，占据了大部分的费用。然而，与使用保障费用相比，维修保障费用在技术上更具有可压缩性。PHM、基于状态的维修（CBM）、货架产品（COTS）、自主保障（AL）等都是压缩维修保障费用的重要手段。

随着航空技术的持续发展，现代航空装备的功能要求、性能要求和使用环境要求不断提升，其系统的复杂化、综合化、智能化程度也不断提高，如何以更经济有效的方式满足飞机使用效能和敏捷、准确的持续保障能力的需求，综合故障诊断、预测与健康管理（PHM）技术获得越来越多的重视和应用。PHM 是对复杂系统传统使用的机内测试（BIT）和状态监视能力的进一步拓展，这种发展的主要技术要素是从状

态监视向健康管理的转变,这种转变引入了诊断和预测能力,借助这种能力识别和管理故障的发生、规划维修和保障,其主要目的是降低使用与保障费用、提高装备系统的安全性、完好性和任务的成功性,实现基于状态的视情维修(CBM)和自主式保障(AL)能力。

本书是在中国航空工业集团公司基础技术研究院《航空基础技术丛书》总体策划下组织编写的,中国航空工业集团公司上海航空测控技术研究所(简称中航工业测控所)承担了该丛书《航空故障诊断与健康管理技术》分册的编写任务。

编写组历经一年多时间,在收集、归纳、分析、消化和整理相关资料和文献的基础上,力求充分把握国内外在航空故障诊断与健康管理技术领域的发展现状和趋势,对航空故障诊断与健康管理技术涉及的一些基础性和共性关键性技术问题和未来的技术发展趋势进行较为系统的分析和研究,厘清该领域涉及的相关专业技术体系与内涵,对航空故障诊断与健康管理技术基本原理、方法等进行概括性的归纳和总结,完成了该书的编写工作。编写组立足于航空工程和技术应用,通过国内外成功的应用案例,阐明“航空故障诊断与健康管理技术”在航空型号工程应用的主要技术目标、系统设计、关键技术和实施途径,以求为在国内更好地开展该领域的工程应用研究提供有效的帮助。

全书共分9章:第1章从健康、异常、故障等概念入手,着重阐述航空故障预测与健康管理技术涉及的一些基本概念、基本内涵,并概括地论述国内外该技术的发展现状等;第2章针对现代飞机的主要构成系统的故障情况,提出故障诊断与健康管理系统功能设计;第3章~第6章介绍航空故障诊断与健康管理技术的基础理论知识;第7章介绍故障诊断与健康管理技术的工程方法及验证评价技术;第8章介绍航空故障诊断与健康管理系统的一般设计开发过程和一些应用工程案例;第9章描述故障预测与健康管理技术的发展趋势。

本书面向航空工程技术人员、工程项目管理人員和从事该领域的专业技术人员,深入浅出,删繁就简,力求取得较好的可读性。旨在扩大该领域基础支撑技术知识的影响面,进一步促进我国航空故障诊断与健康管理技术的应用与推广。

本书适合从事航空工程管理和从事航空故障诊断、预测与健康管理技术领域、航空维修与综合保障的工程技术人员以及高等院校相关专业师生阅读，也可供从事相关技术领域的研究人员作为参考书。

限于编者的水平，不妥及错误之处在所难免，欢迎读者给予批评指正。

《航空故障诊断与健康管理技术》编委会

2013 年 5 月

目 录

第1章 概论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 基本概念	(2)
1.2.1 健康、异常、故障和失效	(2)
1.2.2 故障诊断、预测及健康管理	(3)
1.3 航空故障诊断与健康管理技术的内涵和重要性	(4)
1.3.1 航空故障诊断与健康管理技术的内涵	(4)
1.3.2 故障诊断与健康管理技术对航空装备的重要性	(6)
1.4 航空故障诊断与健康管理技术的演变过程	(10)
1.5 航空故障诊断与健康管理技术的发展现状及应用	(14)
1.5.1 航空故障诊断与健康管理技术的发展现状	(14)
1.5.2 航空故障诊断与健康管理技术的应用概况	(19)
第2章 航空故障诊断与健康管理系统的功能设计	(21)
2.1 概述	(21)
2.2 航空器故障诊断与健康管理需求	(21)
2.2.1 航空器故障诊断与健康管理总体需求	(22)
2.2.2 航空器子系统故障诊断与健康管理需求	(24)
2.3 航空故障诊断与健康管理系统的功能分析	(36)
2.4 航空故障诊断与健康管理系统的架构	(38)
2.4.1 机上系统结构	(38)
2.4.2 系统交联接口	(41)
2.4.3 地面系统结构	(42)
2.5 故障诊断与健康管理基本方法	(43)
2.5.1 扩展故障模式与影响分析	(43)
2.5.2 健康评估与故障诊断	(48)
2.5.3 故障预测及健康管理	(51)
2.6 故障诊断与健康管理的指标及度量	(53)
2.6.1 故障诊断与健康管理能力指标体系	(54)
2.6.2 故障诊断与健康管理系统的指标权衡	(55)
第3章 传感器与数据采集策略	(60)
3.1 概述	(60)
3.2 传感器的基本特性	(61)