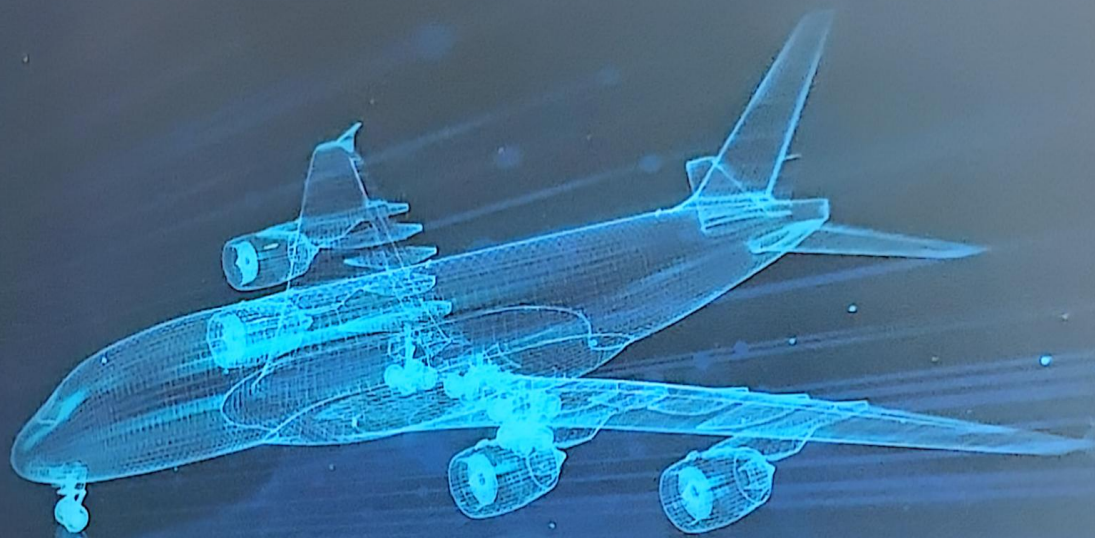




飞机油液分析与状态监测 专家系统原理及应用

陈 果 康玉祥 王洪伟 金 根 著
李 爱 曹桂松 苗慧慧 侯民利



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书建立了飞机油液分析与状态监测专家系统的理论体系和框架,介绍了飞机油液分析与状态监测专家系统的原理、关键技术及实际应用案例。本书力求突出航空特色,做到内容全面、详实,强调理论并突出应用。

在理论方面,本书对专家系统基本原理、磨损趋势预测、磨损界限值制定、磨损故障智能融合诊断、磨损颗粒图像自动识别以及基于数据挖掘的磨损故障诊断知识的自动获取等技术进行了详细阐述。在应用方面,本书介绍了航空发动机磨损监控专家系统和飞机液压系统污染监控专家系统的实际应用,表明了专家系统和智能诊断方法在飞机油液监测中的应用前景。

本书可以作为航空器维修及相关专业的师生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞机油液分析与状态监测专家系统原理及应用 / 陈果等著. -- 北京:北京航空航天大学出版社, 2025. 1.
ISBN 978-7-5124-4549-9

I. V31

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 202435XA57 号

版权所有,侵权必究。

飞机油液分析与状态监测专家系统原理及应用

陈 果 康玉祥 王洪伟 金 根
李 爱 曹桂松 苗慧慧 侯民利 / 著
策划编辑 董 瑞 责任编辑 董 瑞

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京雅图新世纪印刷科技有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:18.5 字数:384 千字

2025 年 1 月第 1 版 2025 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-4549-9 定价:98.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

航空发动机由于其工况复杂、状态变化剧烈,极易产生各种轴承和齿轮类机械故障,因此需要对其健康状态进行有效的监测和诊断。目前,振动和油液分析已经被证实是航空发动机状态监测和故障诊断的重要手段,广泛应用于发动机台架试车和外场监控。两种监控方法各有千秋,互有所长。振动诊断方法主要依据发动机结构类故障的动力学振动机理实施诊断。例如,通过建立含转子不平衡、初始弯曲、不对中、转静碰摩、转子裂纹、密封失稳、齿轮损伤以及滚动轴承剥落等故障的整机振动模型,利用动力学仿真分析得到故障响应,并研究其故障特征和机理。振动诊断方法通过对提取的振动信号的敏感特征加以分析实现故障诊断,能够阐明和解释故障特征产生的原因,因此其诊断思路清晰,诊断过程可解释性强,已经被公认为转子、滚动轴承和齿轮早期故障诊断的有效方法。然而,在对实际航空发动机滚动轴承和齿轮故障进行诊断时,振动诊断方法很容易受噪声干扰。因为实际航空发动机机匣振动信号中,除了微弱的故障信号外,往往还存在转子基频及其倍频、叶片通过频率、气动噪声以及其他轴承和齿轮的干扰频率成分,这使得轴承和齿轮的早期故障特征提取尤其困难。很多在其他环境有效的信号分析方法,在解决实际航空发动机故障诊断时都显得无能为力,其诊断精度和诊断效率难以达到满意的效果。目前已有研究表明,对于含中介轴承的双转子航空发动机,其中介轴承的早期故障难以根据机匣振动信号进行诊断。然而,以油液金属屑检测为依据的油液监控方法能够直接从油液分析数据中提取滚动轴承和齿轮等滑油部件摩擦副的磨损颗粒成分、数量、尺寸、形态和颜色等多维信息,并以此判断磨损的部位、性质及原因。其突出优点是不受发动机复杂工况、振动及背景噪声的影响。当磨损加剧时,油液中金属屑含量急剧增加,此时油液监控方法具有更高的灵敏度,诊断精度也更高。但是,该方法对早期故障诊断不灵敏,其原因主要在于齿轮和轴承早期磨损不严重,产生的金属屑较少,从而导致现有的油液分析技术难以及时检测到。此外,材质相同的不同磨损部件在油液分析数据中很难区分,可能导致滑油监控方法的故障定位较为粗糙。同时,滑油诊断方法具有很强的模糊性和不确定性。正因为如此,以神经网络为代表的现代人工智能技术成了处理这一类非确定性问题的利器,目前已经引起了国内外众多学者的关注。由此可见,振动和油液监控技术在实际航空发动机磨损故障诊断中能够取长补短,相得益彰,共同在航空发动机健康监测和故障诊断中发挥重要作用。

航空发动机的磨损故障诊断主要是通过监测油液中的金属和非金属磨粒的含量、浓度、尺寸、形状和颜色等信息来诊断发动机的传动系统和具有相互运动的摩擦副的磨损性质、磨损类型和磨损部位。常用的方法包括铁谱分析、光谱分析、污染分析、油品理化及能谱分析等。目前主要的研究方向为:① 研制先进的仪器提高油样分析的精度和效率,特别是开发机载的在线油样分析设备;② 收集基于油样分析的磨损诊断经验,建立知识库、样本库或案例库,开发基于人工神经网络和专家系统的智能诊断系统;③ 实现多种分析方法的融合诊断,提高诊断精度。本书主要围绕飞机油液分析与状态监测专家系统展开论述,集中讨论如何利用磨损监测数据进行故障诊断,即利用人工智能技术进行油液数据的趋势预测、诊断界限值的制定、诊断规则提取、磨粒自动识别以及专家智能推理等。随着大数据、互联网及人工智能技术的发展,对大量磨损监测数据的利用和挖掘尤为重要。有数据不一定就有知识,在各种各样的检测仪器面前,在互联网技术高度发达的今天,往往不乏大量的油液检测数据,但是缺乏从大量数据中有效提取诊断知识的方法。因此,这就要求故障诊断研究势必与数据挖掘、互联网技术和人工智能方法紧密结合,实现故障诊断知识规则的自动提取,并通过专家系统加以利用,实现磨损故障智能诊断。这些研究内容在本书的发动机磨损故障诊断的趋势预测、磨粒识别、诊断知识获取、融合诊断等章节均进行了详细阐述。

本书是作者结合近二十年的航空发动机磨损监控专家系统的开发实践撰写而成的。这期间,作者与中国航天科工集团第三研究院于2003年合作开发了航空发动机磨损故障综合诊断专家系统 EFDES 3.0;与北京航空工程技术研究中心于2007年合作开发了航空发动机滑油监控专家系统 EOMES 1.0,于2008年合作开发了航空发动机滑油滤磨屑监控专家系统 EOFMS 1.0,于2012年合作开发了多功能油液磨粒智能检测与分析系统 MIDCS 1.0;与成都飞机工业(集团)有限责任公司于2009年合作开发了飞机液压系统状态监控专家系统 AHMES 1.0,于2010年合作开发了飞机发动机状态监控专家系统 AEMES 1.0,与中国航发商用发动机有限责任公司于2021年合作开发了民用航空发动机磨损检测专家系统 CEWDS 1.0等。

在本书成稿之际,首先要感谢作者的博士后合作导师左洪福教授。在2000—2002年期间的博士后阶段,通过参与左洪福教授团队的相关科研项目,作者进入了飞机油液监控与专家系统研究领域,并从此在该领域开展了二十余年的相关研究工作。其次,要特别感谢在项目合作中对飞机油液监控专家系统开发提出过宝贵意见和建议的各位专家。他们包括中国航天科工集团第三研究院的陈宝廷研究员、张金良研究员、廖仲坤研究员等,北京航空工程技术研究中心的宋兰琪高工、陈立波高工、

宋科高工、张占纲高工、王洪伟高工等,成都飞机工业(集团)有限责任公司的侯民利研究员等,以及中国航发商用发动机有限责任公司的曹桂松高工、苗慧慧工程师、孙智君高工等。最后,还要特别感谢历届在该领域从事相关项目研究的研究生,感谢他们在飞机油液分析和状态监控专家系统领域做出的创新性工作。本书的许多内容来自他们的学位论文,其中主要有:2005 级硕士研究生张强同学的硕士学位论文《飞机液压系统磨损综合监控专家系统研究》、2008 级硕士研究生葛科宇同学的硕士学位论文《发动机磨损故障知识获取方法研究及应用平台开发》、2014 级硕士研究生张全德同学的硕士学位论文《基于数据挖掘的航空发动机磨损界限值制定方法研究》、2020 级硕士研究生马佳丽同学的硕士学位论文《航空发动机磨损故障多目标智能融合诊断》、2010 级博士研究生李爱同学的博士学位论文《航空发动机磨损故障智能诊断若干关键技术研究及专家系统开发》,以及 2012 级博士研究生王洪伟同学的博士学位论文《航空发动机滚动轴承故障诊断与预测关键技术研究》。同时,还要特别感谢 2015 级硕士研究生林桐同学对本书的初稿所做的大量工作,2020 级硕士研究生王雨薇同学、2020 级博士研究生康玉祥同学以及南京航空航天大学的潘文平老师、南京工程学院的郝腾飞老师在专家系统软件开发和图像识别方面所做的创新性工作。

本书的编写工作任务分工如下:第 1 章由陈果、李爱负责撰写;第 2 章由陈果、王洪伟负责撰写;第 3、4 章由陈果、王洪伟负责撰写;第 5、6 章由王洪伟、李爱负责撰写;第 7 章由陈果、金根负责撰写;第 8 章由陈果、李爱负责撰写;第 9 章由苗慧慧和康玉祥负责撰写;第 10 章由康玉祥和曹桂松负责撰写;第 11 章由王洪伟、侯民利负责撰写。

在知识的海洋里,作者深感自己的学识浅薄和不足。本书仅仅触及了飞机油液分析与状态监控技术的冰山一角,许多技术和方法仍在不断发展。由于水平有限和认知偏差,书中难免出现疏漏和错误之处,恳请读者批评指正!

陈 果

2023 年 11 月于南京航空航天大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 飞机磨损故障与智能诊断	1
1.1.1 航空发动机磨损故障与智能诊断	1
1.1.2 飞机液压系统磨损故障与智能诊断	3
1.2 磨损故障诊断研究现状	4
1.2.1 磨损监测仪器的开发	4
1.2.2 专家系统研究与开发	5
1.2.3 基于油液分析多源信息的磨损故障融合诊断	6
1.2.4 基于油样分析数据的发动机磨损趋势预测技术	7
1.2.5 磨损界限值制定技术	9
1.3 油液分析专家系统在磨损监测应用中需要解决的关键问题	10
本章小结	11
参考文献	11
第 2 章 飞机油液分析与磨损监测技术	17
2.1 油样理化分析	17
2.1.1 油液理化性能变化原因及其影响	18
2.1.2 理化分析仪器	19
2.2 油样磨屑分析	22
2.2.1 磁性塞子检测法	24
2.2.2 污染分析法	27
2.2.3 油样光谱分析法	31
2.2.4 油样铁谱分析法	33
2.2.5 电子扫描能谱分析	43
2.3 多功能油液磨粒智能检测与诊断系统	46
2.3.1 基本原理	47
2.3.2 图像采集	47
2.3.3 运动颗粒分析与识别	49
2.3.4 试验验证	53

本章小结	59
参考文献	59
第 3 章 基于规则的专家系统诊断原理	60
3.1 专家系统原理	61
3.1.1 专家系统的组成	61
3.1.2 专家系统的优缺点	63
3.2 基于规则的故障诊断专家系统在 EOMES 1.0 中的应用	63
3.2.1 知识库	63
3.2.2 专家诊断	65
3.2.3 EOMES 1.0 中基于规则的专家诊断实例	65
本章小结	74
参考文献	74
第 4 章 基于案例推理的诊断专家系统	75
4.1 基于案例的诊断方法	75
4.1.1 CBR 的发展历程	75
4.1.2 CBR 原理	76
4.1.3 CBR 的特点	77
4.2 基于案例的专家系统的架构	78
4.3 基于 CBR 的关键技术	78
4.3.1 案例的组织	78
4.3.2 案例相似度的计算	79
4.3.3 案例的检索与匹配	80
4.3.4 基于 CBR 的修正技术	81
4.3.5 基于 CBR 的系统维护技术	81
4.4 飞机液压系统磨损故障 CBR 诊断实例	82
4.4.1 基于 CBR 的飞机液压系统磨损故障诊断关键技术	82
4.4.2 飞机液压系统磨损的 CBR 故障专家系统	85
本章小结	89
参考文献	89
第 5 章 磨损元素界限值制定方法	91
5.1 油样光谱诊断界限值特点	91
5.2 传统油样磨损诊断界限值制定方法	92

5.3 概率密度函数估计	94
5.3.1 概率密度估计问题的描述	94
5.3.2 基于 Parzen 窗法的概率密度函数估计	95
5.3.3 基于 k_N -近邻法的概率密度函数估计	96
5.3.4 基于最大熵法的概率密度函数估计	96
5.3.5 基于支持向量机的概率密度函数估计	97
5.3.6 概率密度函数估计方法验证与比较	100
5.4 航空发动机磨损界限值制定	102
5.4.1 航空发动机油样光谱数据	103
5.4.2 航空发动机油样光谱数据质量浓度界限值制定	104
5.4.3 航空发动机油样光谱数据质量浓度梯度界限值制定	105
5.4.4 航空发动机油样光谱数据质量浓度比例界限值制定	106
5.5 基于数据融合的健康指标界限值制定	107
5.5.1 油液数据融合技术	107
5.5.2 基于 SOM 的健康指标融合	108
5.5.3 基于健康指标的磨损界限值制定	109
本章小结	114
参考文献	114
第 6 章 磨损趋势预测技术	117
6.1 时间序列预测法	117
6.1.1 时间序列预测的基本思想	118
6.1.2 时间序列分类	118
6.2 线性时间序列预测模型	118
6.2.1 自回归滑动平均模型 $ARMA(n, m)$	119
6.2.2 自回归模型 $AR(n)$	120
6.2.3 检验准则	120
6.3 非线性时间序列预测模型	121
6.3.1 相空间重构理论	121
6.3.2 人工神经网络	122
6.3.3 支持向量机预测法	134
6.4 灰色预测法	138
6.4.1 数据累加处理	138
6.4.2 数据累减处理	139
6.4.3 灰色系统的建模	139

6.5 基于 LSSVM 的组合预测模型	141
6.5.1 LSSVM 回归算法原理	141
6.5.2 基于 PSO 的 LSSVM 回归模型优化	143
6.5.3 单一预测模型的选取	145
6.5.4 误差指标	147
6.5.5 获取训练样本	147
6.5.6 组合预测步骤	148
6.6 航空发动机油液光谱分析数据组合预测实例分析	149
6.6.1 算例 1	149
6.6.2 算例 2	152
本章小结	153
参考文献	153
第 7 章 故障诊断知识规则获取技术	154
7.1 数据挖掘理论及知识获取方法	154
7.1.1 数据挖掘中几种典型的知识获取方法	155
7.1.2 数据挖掘工具	157
7.2 基于粗糙集理论的知识规则获取	158
7.2.1 应用粗糙集理论的知识获取流程	158
7.2.2 粗糙集理论关键技术的具体实现	161
7.2.3 诊断实例	163
7.3 基于神经网络规则提取的知识规则获取	165
7.3.1 神经网络规则提取的方法流程	165
7.3.2 神经网络规则提取的关键技术	166
7.3.3 神经网络规则提取在磨损故障诊断中的应用	169
7.4 基于支持向量机的知识规则获取	170
7.4.1 基于 GA-SVC 的知识获取流程	171
7.4.2 数据预处理	171
7.4.3 支持向量聚类算法	174
7.4.4 基于规则的样本识别方法	177
7.4.5 规则的简化	178
7.4.6 诊断实例	179
7.5 基于决策树的知识规则获取	182
7.5.1 典型的决策树分类算法	183
7.5.2 决策树剪枝算法	190

7.5.3 决策树算法的评价	192
7.5.4 基于 C4.5 决策树算法的知识规则获取实例	193
7.6 诊断实例	196
本章小结	198
参考文献	198
第 8 章 磨损故障智能融合诊断	200
8.1 基于 D-S 证据理论的磨损故障融合诊断	200
8.1.1 D-S 证据理论原理	200
8.1.2 基于规则和 D-S 证据理论的发动机磨损故障融合诊断	201
8.1.3 基于神经网络和 D-S 证据理论的发动机磨损故障融合诊断	207
8.1.4 基于模糊集合思想和 D-S 证据理论的发动机磨损故障融合诊断	212
8.2 磨损故障的多 Agent 协同诊断	217
8.2.1 Agent 及多 Agent 系统的理论基础	217
8.2.2 航空发动机磨损故障的多 Agent 协同诊断	220
8.2.3 诊断案例	230
本章小结	233
参考文献	234
第 9 章 基于能谱分析数据的磨损部位诊断	235
9.1 深度学习理论基础	235
9.2 DCNN	241
9.3 长短期记忆网络	242
9.4 残差网络	244
9.5 基于深度学习的磨损颗粒材质分析现状	244
9.6 基于深度学习的磨损颗粒材质分析技术实例	245
9.6.1 训练数据生成	246
9.6.2 模型训练与测试	247
9.6.3 航空发动机磨损颗粒能谱数据验证	248
本章小结	251
参考文献	251
第 10 章 基于扫描电子显微镜图像的磨损颗粒分析技术	253
10.1 基于深度学习的目标检测算法	253

10.1.1 概 述	253
10.1.2 YOLO	254
10.2 磨损颗粒分析方法	257
10.3 磨损颗粒分析实验	259
本章小结	262
参考文献	263
第 11 章 飞机发动机磨损状态监测专家系统应用	264
11.1 航空发动机滑油监控专家系统(EOMES 1.0)	264
11.1.1 专家系统简介	264
11.1.2 专家系统整体架构	265
11.2 飞机发动机磨损状态监控专家系统(AEMES 1.0)	266
11.2.1 专家系统简介	266
11.2.2 专家系统整体架构	268
11.3 飞机液压系统磨损状态监控专家系统(AHMES 1.0)	269
11.3.1 专家系统简介	269
11.3.2 专家系统整体架构	270
11.4 多功能智能磨粒检测系统(MIDCS 1.0)	272
11.4.1 系统简介	272
11.4.2 系统整体架构	273
11.5 民用航空发动机磨损检测专家系统(CEWDS 1.0)	274
11.5.1 专家系统简介	274
11.5.2 专家系统整体架构	275
附表 某型航空发动机油液光谱数据样本	277