

航空发动机状态监测与故障诊断技术

艾延廷 编著



北京理工大学出版社



普通高等教育“十三五”规划教材

AEROENGINE CONDITION
MONITORING AND FAULT
DIAGNOSIS TECHNOLOGY

航空发动机状态监测与 故障诊断技术



AEROENGINE CONDITION MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS TECHNOLOGY

艾延廷 王克明 沙云东 等编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

全书共分9章,构建了比较完善的航空发动机状态监测与故障诊断技术方法与知识体系,系统地介绍了机械故障诊断的基本理论与方法,包括:信号分析与处理基本理论,轴承、齿轮及转子的故障诊断理论,典型的故障诊断方法和智能故障诊断理论。本书以状态监控与故障诊断的理论和方法为主线,即从性能、振动、滑油状态、寿命损耗、无损检测等方面分别论述这些理论及其在航空发动机上的应用。本书对于重点内容力求理论联系实际,并尽量引进新技术、新方法,做到图文并茂。

本书适用于飞行器动力工程专业本科教学和航空宇航推进理论与工程学科研究生教学,同时兼顾相关领域工程技术人员的工作需要。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机状态监测与故障诊断技术/艾延廷等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2017.7

ISBN 978-7-5682-4262-2

I. ①航… II. ①艾… III. ①航空发动机-设备状态监测②航空发动机-故障诊断
IV. ①V263

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第155643号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/18.5

字 数/438千字

版 次/2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷

定 价/58.00元

责任编辑/陈莉华

文案编辑/陈莉华

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

航空发动机作为一种复杂的热动力机械,包括多个机电系统,由一万多个零部件组成,其常见工作状态包括启动、慢车、巡航、加力、停车等多种状态,最高转速高达一万多转/分,甚至数万转/分。随着航空发动机技术的发展及需求的提高,涡轮前温度已经达到 $1\ 800\ ^\circ\text{C}$,发动机流道内气体压力高达 $100\ \text{Pa}$ 。高温、高压、高转速的工作状态和条件,导致航空发动机易出现各种故障,而作为飞行器的动力源要求其具有极高的安全性与可靠性。航空发动机状态监测与故障诊断技术的发展,对航空发动机设计、使用与维护具有重要的意义。

国内有关机械状态监测与故障诊断的教材较多,但针对航空发动机状态监测与故障诊断技术的教材较少。本书适用于飞行器动力工程(航空发动机维修方向)本科教学和航空宇航推进理论与工程研究生教学,同时兼顾相关领域工程技术人员的工作需要。

本书构建了比较完善的航空发动机状态监测与故障诊断技术方法与知识体系,系统地介绍了机械故障诊断的基本理论与方法,包括:信号分析与处理基本理论,轴承、齿轮及转子的故障诊断理论,典型的故障诊断方法和智能故障诊断理论。本书以状态监测与故障诊断的理论和方法为主线,即从性能、振动、滑油状态、寿命损耗、无损检测等方面分别论述这些理论在航空发动机上的应用。本书突出理论的实际应用,做到图文并茂。信号分析理论、航空发动机振动监测与故障诊断、航空发动机滑油监测与故障诊断、航空发动机气路性能监测与故障诊断以及无损检测技术是课程的重点,其中气路性能监测与故障诊断是课程的难点。对于重点内容力求理论联系实际,并尽量引进新技术、新方法。

全书共分9章。第1章介绍航空发动机故障诊断的基本概念,第2章介绍有关信号分析与处理的基本知识,第3章介绍故障诊断的常用方法,第4章介绍智能故障诊断方法,第5章介绍轴承、齿轮及转子故障诊断的相关技术与方法,第6章介绍发动机性能状态监测与故障诊断技术,第7章介绍基于发动机机械状态的故障诊断技术与方法,第8章介绍航空发动机故障无损检测技术,第9章介绍航空发动机使用寿命监控与健康管管理。本书第1章、第2章、第9章由艾延廷编著,第3章由沙云东编著,第4章由张凤玲编著,第5章由王克明编著,第6章、第7章由王志、田晶编著,第8章由项松编著。

限于作者的水平和能力,本书难免存在不足和不妥之处,衷心希望广大读者批评与指正。

作者
2017年4月

目 录

CONTENTS

第 1 章 发动机状态监测与故障诊断概述	001
1.1 发动机状态监测与故障诊断的目的与任务	001
1.1.1 基本概念	001
1.1.2 状态监测与故障诊断的目的与任务	002
1.2 发动机状态监测与故障诊断方法	003
1.2.1 性能状态监测和故障诊断	003
1.2.2 机械状态监测与故障诊断	004
1.2.3 无损检测	005
1.3 发动机状态监测与故障诊断实施过程	005
1.3.1 故障库建立	005
1.3.2 监测与诊断实施	006
1.4 发动机状态监测与故障诊断系统	006
1.5 发动机故障诊断技术发展趋势	008
第 2 章 信号分析与处理	009
2.1 信号分类及其描述	009
2.1.1 信号分类与基本描述	009
2.1.2 周期信号与离散谱	012
2.1.3 非周期信号与傅里叶变换	014
2.2 数据采集	014
2.2.1 数据采集系统	014
2.2.2 滤波与滤波器	015

2.2.3 数据采集原理	017
2.2.4 时间窗函数及其选择	023
2.3 离散信号频域分析	026
2.3.1 离散傅里叶变换	026
2.3.2 快速傅里叶变换	029
2.4 信号的幅域分析	032
2.4.1 概率密度函数及概率分布函数	032
2.4.2 常用幅域参数的定义与计算公式	034
2.5 信号的时域分析	035
2.6 信号的频域分析	039
2.6.1 信号的幅值谱与相位谱	039
2.6.2 阶比谱	040
2.6.3 功率谱	041
2.6.4 倒频谱	045

第3章 故障诊断的常用方法

049

3.1 Bayes 分类法	049
3.1.1 条件概率	049
3.1.2 全概率公式	049
3.1.3 最小错误率的 Bayes 决策规则	050
3.1.4 最小平均损失	051
3.2 线性判别函数法	052
3.2.1 线性判别函数的基本概念	052
3.2.2 设计线性分类器的主要步骤	054
3.2.3 Fisher 线性判别函数法	054
3.3 距离判别函数法	056
3.3.1 空间距离(几何距离)函数	056
3.3.2 信息距离判别法	057
3.4 最小二乘估计法	058
3.5 时序模型分析法	061
3.5.1 ARMA、AR 和 MA 模型	061
3.5.2 ARMA 模型的建模	063
3.5.3 ARMA 模型的预测	066

3.5.4 ARMA 模型的频域故障诊断	067
3.6 极大似然估计法	068
3.6.1 极大似然估计	068
3.6.2 正态线性模型的极大似然估计	069
3.7 最小方差估计法	070
3.7.1 最小方差估计的概念和性质	070
3.7.2 线性最小方差估计	071
3.7.3 线性最小方差估计的递推算法	074
3.8 Kalman 滤波法	074
第 4 章 智能故障诊断方法	080
4.1 灰色理论诊断方法	080
4.1.1 灰色预测法	080
4.1.2 灰色关联度分析	082
4.2 模糊诊断方法	083
4.2.1 隶属函数	083
4.2.2 模糊矢量	087
4.2.3 模糊关系方程	087
4.2.4 模糊诊断准则	087
4.3 神经网络诊断方法	088
4.3.1 神经网络的基本原理	089
4.3.2 BP 神经网络	091
4.3.3 某型航空发动机整机振动故障诊断实例	095
4.4 基于遗传算法的故障诊断方法	098
4.4.1 遗传算法的基本理论	098
4.4.2 遗传算法的基本原理和方法	102
4.4.3 遗传算法的一般运行过程	107
4.4.4 基于进化计算的故障特性分析一般过程	109
4.5 基于支持向量机的故障诊断方法	113
4.5.1 统计学习理论	113
4.5.2 支持向量机	114
4.5.3 支持向量机(SVM)的分类	116
4.5.4 航空发动机整机振动故障诊断实例分析	119

4.6 专家系统故障诊断方法	120
4.6.1 专家系统的基本结构及功能	121
4.6.2 知识表示与知识获取	122
4.6.3 专家系统的局限性	124
第5章 旋转机械振动故障诊断	126
5.1 滚动轴承故障及其诊断方法	126
5.1.1 滚动轴承故障的基本形式	126
5.1.2 滚动轴承的振动机理与典型故障的振动特征	127
5.1.3 滚动轴承故障的振动诊断方法	133
5.2 齿轮故障及其诊断方法	134
5.2.1 齿轮故障的基本形式	134
5.2.2 齿轮的振动及其特点	135
5.2.3 齿轮故障的振动诊断方法	141
5.3 转子系统故障及其诊断方法	143
5.3.1 转子振动的基本特性	143
5.3.2 转子典型故障的机理与振动特征	150
5.3.3 转子振动故障诊断的一般方法	163
5.3.4 转子振动故障的全息谱诊断法	169
5.3.5 利用征兆的故障诊断方法	170
第6章 航空发动机性能状态监测和故障诊断	182
6.1 发动机性能监测和故障诊断的目的和功能	182
6.2 发动机测量参数选择与数据获取	182
6.2.1 基本测量参数	182
6.2.2 可扩展性能监测参数	183
6.2.3 性能监测参数数据获取方法	184
6.3 性能监测参数基线确定	185
6.3.1 基线模型建立方法	185
6.3.2 参数偏差值修正	187
6.4 监测数据处理方法	187
6.4.1 测量数据预处理	187
6.4.2 消除多项式趋势项	188

6.4.3 数据平滑	190
6.5 性能监测和故障诊断方法	192
6.5.1 阈值诊断法	193
6.5.2 参数对比法	193
6.5.3 模型分析法	194
6.5.4 趋势分析法	200
6.5.5 指印图诊断法	203
6.5.6 测量数据的有效性检查	204
第7章 航空发动机机械状态监测和故障诊断	206
7.1 航空发动机振动监测和故障诊断	206
7.1.1 航空发动机振动的特点与测量	206
7.1.2 航空发动机主要振源分析	207
7.1.3 航空发动机振动监测与故障诊断系统的组成	210
7.1.4 航空发动机振动故障诊断实例	212
7.2 航空发动机滑油监测和故障诊断	223
7.2.1 滑油监测和故障诊断的目的与要求	223
7.2.2 滑油系统工作状态监测	224
7.2.3 滑油屑末监测	224
7.2.4 滑油理化性能监测	233
第8章 无损检测技术及其应用	237
8.1 无损检测技术概述	237
8.1.1 发动机延寿工作中的无损检测	238
8.1.2 新机新材料的无损检测	238
8.2 超声检测	238
8.2.1 超声检测原理	239
8.2.2 超声检测仪器与探头的选择	239
8.2.3 超声检测的优点和局限性	240
8.2.4 超声检测在航空发动机维修中的应用	241
8.3 涡流检测	242
8.3.1 涡流检测原理	243
8.3.2 涡流检测的优点和局限性	243

8.3.3	涡流检测技术可检测的主要项目	243
8.3.4	涡流的趋肤效应和渗透深度	244
8.3.5	涡流检测仪器	244
8.4	磁粉检测	246
8.4.1	磁粉检测原理	246
8.4.2	磁粉检测的优点和局限性	247
8.4.3	磁粉检测在航空维修中的应用	247
8.5	射线检测	248
8.5.1	射线检测原理	249
8.5.2	射线检测的优点和局限性	249
8.5.3	射线检测的适用范围	249
8.5.4	射线检测在航空发动机维修中的应用	249
8.6	渗透检测	250
8.6.1	渗透检测原理	250
8.6.2	渗透检测的优点和局限性	251
8.6.3	渗透检测的应用	251
8.7	内窥镜测量(孔探)技术	253
8.7.1	内窥镜的构造及使用	253
8.7.2	航空发动机多发故障分析	255
8.7.3	孔探技术在航空发动机维修中的应用	255
8.7.4	孔探技术的延伸及发展	257
第9章	航空发动机使用寿命监控与综合健康管理	258
9.1	航空发动机使用寿命监控	258
9.1.1	航空发动机使用寿命监控和管理的目的	258
9.1.2	航空发动机使用寿命监控	259
9.1.3	航空发动机零件寿命管理	266
9.2	航空发动机综合健康管理	269
9.2.1	EPHM 系统的基本构成	269
9.2.2	EPHM 系统设计要求	272
9.2.3	EPHM 系统设计的关键技术	273
9.2.4	EPHM 系统与飞机、发动机的交联	276
9.2.5	发动机健康管理技术的发展趋势	279
	参考文献	281

第 1 章

发动机状态监测与故障诊断概述

1.1 发动机状态监测与故障诊断的目的与任务

状态监测与故障诊断（Condition Monitoring and Fault Diagnosis, CM & FD）是 20 世纪 60 年代初发展起来的一门学科，它是多学科相互渗透、相互交叉、相互促进的产物。航空发动机状态监测与故障诊断技术在状态监测与诊断领域中是发展最早、应用最广、最具有代表性的一个重要分支。

1.1.1 基本概念

1. 状态与状态参数

状态即发动机的技术状况。发动机的基本技术状况分为正常状态、异常状态和故障状态。当发动机、发动机附件或子系统的功能指标均处在规定的范围之内时称为正常状态，这时发动机能够正常地完成规定的任务；异常状态通常是一个相对状态，这时发动机、发动机附件或子系统的功能指标或物理指标相对其原始数值发生了较大的偏差，但仍处于规定的范围之内，如发动机的推力下降、振动增加等，发动机尚可完成规定的任务。异常状态的出现一般是由于发动机的某种缺陷已有一定的扩展或出现了某种缺陷。当发动机、发动机附件或子系统的功能指标或物理指标低于（或高于）规定的最低（或最高）指标限制值时称为故障状态，这时发动机无法完成规定的任务，故障往往是由于某种缺陷不断扩大经由异常状态进一步发展而形成的，但故障并不意味着失效。

能够表征并区分发动机技术状况的各种连续的或离散的可测量参数均可称为状态参数或状态量。这些状态参数通常既包括了发动机的各种工作参数，也包括了专门的监测参数，如发动机的转速、排气温度、振动、裂纹尺寸等。在发动机状态监测与故障诊断中，所使用的状态量的集合称为状态向量。

在发动机状态监测与故障诊断中使用的状态参数包括两大类：一类是发动机的各种工作参数，即与发动机设计功能相联系的机械、气动及热力参数，如转子转速、涡轮前（或后）燃气温度、燃油消耗率等，工作参数还可以根据其特点分为基本参数、辅助参数和故障参数等，这类参数通常都需要在换算后才能使用，其中携带的故障信息往往是隐含的；另一类是专门的监测参数，这类参数的针对性很强，通常可以直接使用，其中携带的故障信息是直接的、具体的。也有的参数兼有这两类参数的特点，如喘振参数，这些参数一般属于工作中的故障参数。因此，根据参数的特点，选择监测的手段与方法。

2. 故障及故障分类

故障的范畴一般包括以下内容。

(1) 引起装备立即丧失其功能的破坏性事故。

(2) 与降低装备性能相关联的性能上的事件。

(3) 即使装备当时处于正常工作状态,而操纵者误操作或蓄意破坏,环境条件恶化使装备偏离正常状态的事件。

根据故障特点,发动机故障可按以下几种方式分类。按故障的持续时间可以分为暂时性的与持久性的;按故障发生、发展的进程可分为突发性的(不能靠早期试验或测试来预测的故障)与渐发性的(能通过早期试验或测试来预测的故障);按故障的严重程度可分为破坏性的和非破坏性的;按故障发生的原因可分为先天性的、劣化性的和滥用性的;按故障的形式可分为结构型故障(如裂纹、磨损、腐蚀、不平衡、不对中等)与参数型故障(如失速喘振、共振和超温等);按故障发生的时期可分为早期故障、使用期故障和后期故障;按故障的影响程度可分为局部性的(导致某些功能的丧失,但不会引起所需功能的全部丧失)和全局性的(完全丧失所需功能)。

3. 发动机状态参数及其获取

发动机状态参数中的工作参数和部分监测参数的测量必须在发动机工作时进行,即在发动机地面试车或在飞机飞行中完成。由于飞行中发动机的许多工作条件在地面试验中无法模拟,如高空小速度飞行的大换算转速和小进气压力、低空大速度飞行的进气高压和高温、大涵道比涡轮风扇发动机低压涡轮的高空工作状态以及飞机机动飞行时的进气流场等。另外,飞行参数的测量不需要额外消耗时间、燃料和浪费发动机使用寿命。因此,飞行中发动机状态参数的测量是获取发动机状态参数的主要手段。另外,还有部分发动机监测参数需要在发动机不工作情况下完成,因此,地面模拟试验也是一种不可或缺的参数获取方法。

发动机主要部件可采用的参数测量手段如图 1.1 所示。

发动机生产试车和外场使用实践证明,测量和分析 20~100 个参数的方法就能够客观地评定批生产的发动机状态。但在调试发动机的条件下,以及在必须评定其诊断深度达到单个零部件的发动机技术状态时,需要测量和分析 200~1 000 个参数。

1.1.2 状态监测与故障诊断的目的与任务

状态监测与故障诊断包括监测与诊断两个层次的内容,如图 1.2 所示。

状态监测的任务是采用各种测量、分析和判别方法,结合发动机的历史状况和运行条件,弄清发动机所处的客观状态,以便科学、合理地确定发动机的使用与修理,包括确定和预测可能的故障。这项工作一般由地勤和空勤人员完成。发动机故障诊断的任务则是需要进一步确定故障的性质、程度、类别、部位、原因,乃至说明故障发展的趋势及影响等,为预报、控制、调整、维修与改进提供依据。这项工作一般由专门的技术人员完成。

总之,状态监测与故障诊断的任务就是通过掌握发动机过去和现在运行中或(基本上)不分解情况下的状态,判断其质量优劣、利用程度、是否安全、有关异常或故障的原因及预测对将来的影响,从而确定使用、维修和控制策略。

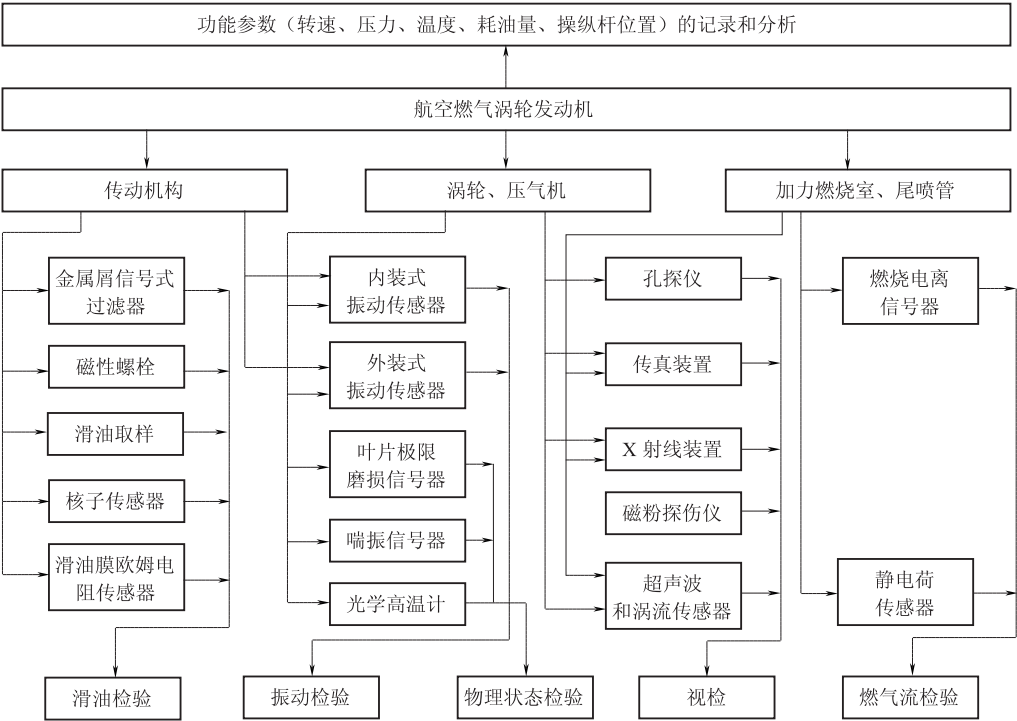


图 1.1 燃气涡轮发动机主要部件可采用的状态参数测量手段

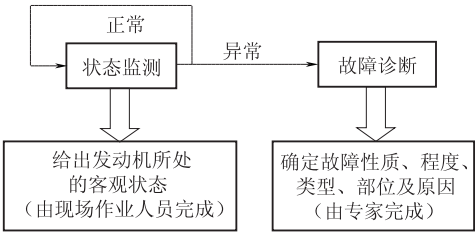


图 1.2 状态监控与故障诊断的任务

1.2 发动机状态监测与故障诊断方法

由于发生故障的部位不同、征兆不同、故障的性质和原因也不同，因此需要用不同的方法进行监测和诊断。根据对监测功能的要求和发动机型号的差异，可以选择一种使用，也可以选择同时选择几种方法综合使用。发动机状态监测和故障诊断的方法可概括为以下 3 类。

1.2.1 性能状态监测和故障诊断

1. 性能状态监测和部件故障诊断

气流流经发动机时，发动机故障能通过气路的气动热力参数和性能参数变化反映出来。气路性能状态监测和部件故障诊断是利用传感器测量发动机的气动热力参数、性能参数、几

何可调部件的位置参数来监视发动机以及其气路部件的健康状况，当发现部件工作异常或发生故障时，及时向机组人员报警并分析故障原因。气路性能状态监测又称为气路分析方法 GPA (Gas Path Analysis)。

2. 性能趋势预测分析

随着发动机的使用，发动机性能必然下降，这需要对发动机性能的衰退程度进行预测评估。精确的发动机性能趋势预测是判断发动机是否发生故障的基础，因为这种预测不但可以及时更新机载故障诊断算法中的发动机基准性能，还可以提高诊断的准确率，减少虚警的发生。

3. 气路碎屑监测

气路碎屑监测是对发动机气路碎屑携带的静电进行监测的一种新技术。发动机在正常状态下工作时，尾气中的总体静电荷会保持在一个正常水平，因此可以将这个正常水平作为发动机性能衰退的一个阈值。当气路部件发生表面故障时，就会在尾气中产生多余的碎屑，导致总体静电荷水平超过阈值，可根据该变化表现出的不同特征判断出故障类型，并作出预警。气路碎屑监测不但能保证早期预警和故障跟踪，还能跟踪后期的故障发展情况，为维修计划安排提供依据。

1.2.2 机械状态监测与故障诊断

1. 振动监测

振动监测关注所有工作速度下的危险振动状态，避免由发动机组件退化所造成的二次损坏。通过振动监测可实现发动机损伤的早期监测，分析振动参数的变化率和变化趋势并以此发现潜在的故障，从而保证发动机的结构完整性，提高飞行安全性。振动监测由机载和地面两部分构成。机载部分将发动机特定部位测量的振动幅值与预先设定的阈值作比较，超过界限时将发送警告到驾驶舱、监测系统或维修系统。地面部分用算法和模型对机载数据做进一步处理，监测振动趋势，提前发出异常报警，以便维修人员及时采取措施。

2. 滑油监测

滑油监测的目的是利用滑油系统工作参数来监测滑油本身的理化性能和发动机所有接触滑油的零部件的健康情况，从而提供有关发动机的健康状态信息。滑油监测是发动机状态监测与故障诊断的重要手段，主要涉及以下 3 个方面。

1) 滑油系统工作状态监测

滑油系统工作状态监测是对滑油的压力、温度、总量和消耗量及油滤堵塞参数的指示，其方法有超限警告和趋势分析。例如，滑油喷嘴、油滤堵塞或调压工作异常可能造成的滑油压力增高；而泄漏、油管破裂、调压阀门工作异常等则会引起滑油压力下降。过高滑油温度同其他滑油系统监测参数一起可反映发动机子系统的故障。监测滑油量和添加量可得到有关滑油消耗量过高及滑油泄漏的信息。

2) 滑油碎屑监测

滑油不但有润滑和冷却的作用，还有运输碎屑的作用。滑油碎屑监测任务是监测接触滑油的发动机零部件的健康状况，及时发现这些零部件由于表面故障产生的碎屑，避免造成发动机二次损伤。

3) 滑油理化性监测

对滑油进行理化性能监测，可提供滑油的状态及某些发动机工作异常的信息。通风、温度及滑油的消耗量、系统容量和成分等均可能影响滑油理化性能降低速率和程度。可对滑油的氧化性、附加损耗、胶体杂质含量和总酸度等理化性能进行监测，以确定滑油的可用性。

1.2.3 无损检测

利用专用设备检查发动机零部件的机械损伤，一般只做地面检测用。最广泛使用的是孔探检查。其他还有涡流检测、同位素照相检查、超声检查、磁力探伤、液体渗透检查以及声学检查等。随着科学技术的进步，还有一些新的检测方法和设备正在不断地研制和应用。

1.3 发动机状态监测与故障诊断实施过程

状态监测与故障诊断的实施过程包括故障库建立和监测与诊断实施两大部分，如图 1.3 所示。

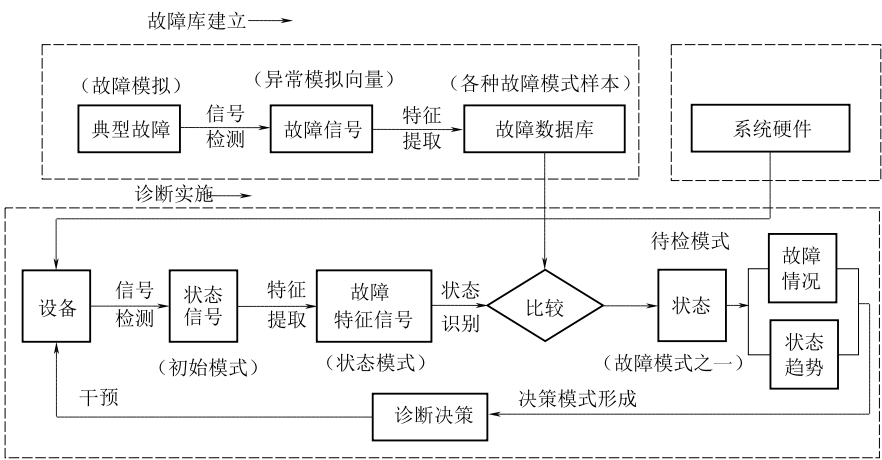


图 1.3 状态监测与故障诊断实施过程

1.3.1 故障库建立

故障库是一种编制好的有关各种发动机的不同性质、不同部位、不同程度的故障样本数据档案。故障数据库的建立是根据现场在线监测数据的长期积累、试验室研究和分析、计算机数值仿真模拟试验等实现的。现场监测数据需要长期积累；在试验室中通过人为设计故障进行测试、分析需要大量的人力和物力成本。例如，在 JSF-35 发动机状态监控与故障诊断系统设计中，进行了数万小时的故障模拟试验；近年来发展起来的发动机数值仿真技术 NPSS (Numerical Propulsion Simulation System)，在一定程度上能模拟出发动机正常状态和故障状态的数据，为发动机故障数据库的建立提供了一个有效方法，具有很好的发展前景。然而，无论是采用哪种方法，都离不开事先对发动机正常和故障状态进行大量的试验、观察、分析、统计和归纳。

1.3.2 监测与诊断实施

状态监测与故障诊断的实施过程包括以下几个重要环节。

1. 信号检测

按照不同的诊断目的选用一定的检测方法和检测系统,及时而正确地测量足够量的发动机工作状态参数和环境参数,进而构成初始模式向量。

2. 特征提取

故障特征提取的过程就是利用信号处理方法将初始模式向量进行维数压缩、形式变换、排除或削弱噪声干扰、去掉冗余信息、保留或增强有用信息、精化故障特征信息的过程。信号处理可以从统计的观点出发,也可以从系统分析的观点出发,在时域、频域、幅值域、时差域、倒频域中弄清信号的波形、强度、波动度、概率分布、相似性、相位变化、频率结构以及传递特性等,进而获取表征发动机故障特征的标准模式向量。

3. 状态识别

状态识别是指将待检模式与标准模式进行比较,并将其归属到某一已知的标准模式中的过程。状态识别需要建立判别函数,规定判别准则,并力争使误判率最低。状态识别的方法包括主成分分析法、聚类分析法、统计模式识别法、模糊模式识别法和系统表示法等。

4. 诊断决策

当判别结果为异常或故障时,必须对异常或故障的原因、部位、危险程度等进行评估,并采取相应的对策对发动机及其工作进行预测和干预。预测就是对故障产生的结果以及还能运行的时间进行估计;干预包括临时处置方案、加强监控方案以及更换大修方案和措施。

1.4 发动机状态监测与故障诊断系统

在军用发动机方面,包括战斗机、运输机、直升机都无一例外地采用发动机状态监测与故障诊断系统。例如 1969 年开始研制的涡轴发动机 T700-GE-700 和 T700-GB-701 的状态监测系统 CMS (Condition Monitoring System); 1970 年开始研制的 TF41-A-2 发动机的飞行中状态监测系统 IECMS (In-flight Engine Condition Monitoring System),在批生产时改称为发动机监测系统 EMS; 1979 年开始为 F404-GE-400 发动机设计的 IECMS 是一个实时发动机监测和寿命跟踪系统,已安装在所有批生产和试验飞机上。英国于 1975 年开始发展了发动机使用监测系统 EUMS (Engine Usage and Monitoring System) 和低疲劳循环计数器 LCFC (Low Cyclic Fatigue Counter),20 世纪 80 年代又综合两者的经验,发展了机群通用的单元体诊断系统。1982 年开始发展 F100-PW-220 的 EMS (Engine Monitoring System) 系统;1985 年首套生产型交付使用;1987 年飞机综合和后勤数据库兼容,系统继续扩大和改进;美国空军的 EMS 被设计成可管理所有类型的军用发动机,其扩展型 CEMS (Comprehensive Engine Management System) IV 和 RD&T 增加了发动机参数趋势分析,向世界各地 100 个空军基地提供发动机诊断和趋势分析功能。美空军反对各公司发展不同的系统,导致监测设备增加、成本增加,而是统一发展了基地用的空军发动机诊断和趋势分析网。早期曾对 EPMS (Engine Performance Monitoring System) 系统进行了大量的研究和试验,以证实系统的可行性和必要性。例如,对安装在 F15 战斗机上的 F100 加力涡扇发动机,用 5 架 F15、12 台

F100 发动机，进行了 2 700 h 的飞行试验，统计得出的诊断效果如表 1.1 所示。

表 1.1 EPMS 诊断准确率统计

发动机状态	诊断结论	次数	备注
无故障	无故障	1 006	正确
无故障	有故障	6	误诊
有故障	有故障	63	正确
有故障	无故障	3	漏诊

由表 1.1 可知，诊断错误次数和诊断正确次数之比为 9 次/1 069 次 = 0.84%。可见，EPMS 系统的诊断成功率是很高的。

为了帮助查找故障，近年来发展了诊断发动机故障的专家系统，如 XMAN 和 JET-X。俄国的苏-27 飞机上也有类似的状态监测系统。对于欧洲战斗机所用的新一代发动机 EJ200 也发展了一个综合的监测和记录系统。

在民用发动机方面，世界各航空公司使用发动机制造公司提供的系统，如 P&W 公司的发动机状态监测系统 ECM II、发动机状态监测和故障诊断系统 TEAM III、试车台使用的发动机单元体性能分析系统 MAP III；GE 公司的 ADEPT 系统和 GEM 系统；RR 公司的 COMPASS 等。以上系统都是在 DOS 操作系统的基础上开发的，用户界面都比较简单。随着 PC 机和 Windows 操作系统的升级换代，各公司在此基础上发展了新的 EPMS 软件，如 RR 公司向中国用户提供了 Navigator 系统，用以替代 COMPASS 系统。我国 1988 年由北京飞机维修公司、北京航空航天大学、中国民航学院和东方航空公司 4 个单位联合研制 EMD（Engine Monitoring and Diagnosis）系统。

我国军用发动机的状态监测和故障诊断系统刚起步，在现役战斗机上，主要靠座舱仪表指示被监测的参数，由驾驶员直接进行目视监视。在新研制的发动机上正逐步发展更好的装置或系统，如 WP-14 上装有使用寿命监视的历程记录器。现在不论从用户的需求或从机载航空电子的进步，还是从发动机数控系统的采用等方面，都具备了发展更高水平的监测和故障诊断系统的条件，现已开展设计工作，尚缺乏设计和实践经验。

发动机监测系统的开发应作为发动机的一个组成部分并列入飞机的技术要求，其发展计划应和新发动机和飞机发展计划平行进行。过迟的发展或在已服役的飞机或发动机上增加监测系统，则费用高而且功能上会受到限制。

发动机监测和诊断系统的功能依据复杂程度不同可以分成不同水平，一个系统可以完成下面部分或全部功能。

- (1) 提供飞行中或地面上出现的事件数据。
- (2) 利用测量参数确定飞行剖面 and 发动机油门动作以评定发动机使用的苛刻程度。
- (3) 利用系统所提供的累计信息，如发动机工作小时、启动次数、循环次数、蠕变和磨损等可确定发动机寿命消耗，并据此安排零部件剩余寿命的使用计划。
- (4) 提供发动机可调整部位的调整状态，指出发动机偏离规定的调整位置 and 进行修正所需的数据，以改进发动机的调整和修正过程。
- (5) 利用气动热力参数监测、振动和滑油等监测提供的信息对发动机进行监测和诊断，