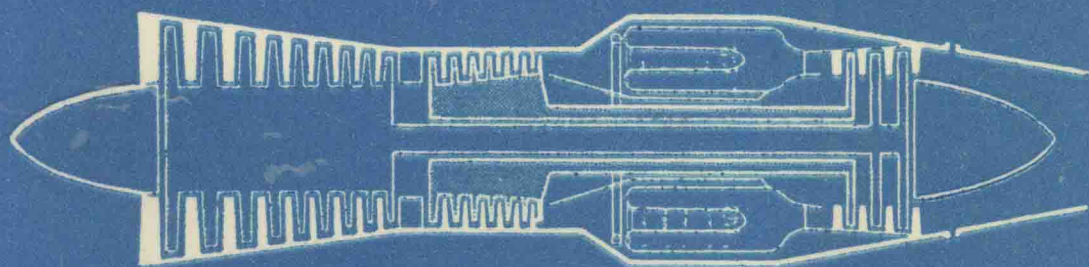


发动机磨损状态 监测与故障诊断技术

左洪福 编著



航空工业出版社

航空基金和民航基金资助项目

发动机磨损状态监测 与故障诊断技术

左洪福 编著

航空工业出版社

1995

内 容 提 要

本书是作者从事发动机磨损监测与故障诊断技术研究成果的总结,也包含了国内外有关科学研究成就。内容主要包括磨损监测的摩擦学基础,铁谱、光谱等滑油分析技术,磨粒的计算机图像分析与识别技术,时序分析与趋势预测方法,磨损类故障的诊断方法,典型的故障监测系统,以及针对航空发动机、船舶柴油机等设备的监测实例分析。论述以航空发动机为主要对象,适当介绍了大型柴油机等设备的监测问题。所提供的技术方法和数据对一般机械设备是适用的,可以比较直接地用于工程实践之中。

该书的主要读者对象为设备管理工作者和维修工程技术人员,也可作为机械、动力、交通等类的教师和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

发动机磨损状态监测与故障诊断/左洪福编著. —北京:
航空工业出版社, 1996. 10
ISBN 7-80046-922-0

I. 发… II. 左… III. ①发动机-航空发动机-磨损-动态检测②发动机-航空发动机-故障检测 IV. ①TK05②V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 07338 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

南京航空航天大学印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

1996 年 10 月第 1 版

1996 年 10 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 10.25

字数: 261 千字

印数: 1—1 000

定价: 18.00 元

序

《发动机磨损状态监测与故障诊断技术》一书系统地论述了机械磨损监测技术的原理、理论和方法,其中主要内容是作者近几年在发动机状态监测与故障诊断技术方面研究成果的总结,书中也包含了国内外有关科学研究成就。

通览全书,不难看出作者始终贯穿的中心思想是磨损故障的监测与诊断问题。“概论”是对发动机诊断技术整体轮廓的总体勾画;第1章至第2章建立了监测技术的摩擦学理论基础,虽然是对磨损理论的概要介绍,其中也不乏作者的独立见解;第3章介绍了铁谱技术、光谱技术等主要的滑油监测方法,DMAS铁谱分析系统代表了作者在这方面的最新研究成果;第4章把图像分析与识别方法全面地移植到铁谱技术中去,建立了磨粒形态学的分析体系,这是对DMAS铁谱分析系统中的计算机辅助视觉技术的进一步剖析;第5章是磨损过程的时序分析,介绍了时间序列方法在磨损监测、诊断以及磨损趋势预测的时序模型和算法;第6章简要介绍了磨损故障诊断的有关方法,包括磨粒和磨损模式的识别、诊断知识系统以及民航发动机磨损故障的例行检查程序;第7章以作者的部分成果为主,介绍了几种实用的在线监测系统;第8章是对作者在地面齿轮箱、航空发动机及船舶柴油机等方面的监测实例所做的部分分析,既作为通篇理论、方法的实践检验,是对磨损失效所作的进一步实验研究。

由上述内容可见,该书对于从事于机械磨损监测和故障诊断的工程技术人员来讲不仅是参考书,而且所提供的技术方法和数据可以比较直接地用于工程实践之中,由此可见该书出版的意义和价值。当然该书亦可以作为机械工程学科的教师和研究生的教学参考书。

该书的作者左洪福同志是一位青年学者。从他在攻读博士学位起始,就对机械磨损监测技术方面产生兴趣,打下了良好的基础。近年来,他承担数项国家基金和企业科研项目,取得了宝贵成果,因此作者亦获得了省部级科技进步奖和光华科技基金奖。可以认为作者已是该项技术青年专家,在相关领域有较好的知名度。我祝愿作者在今后的科研和教学工作中能取得更大的成就,在学术上作出更突出的贡献。

刘正坝

1996.9 于南京

主要符号说明

注: 括号“()”内为书中首次引出该符号的章节号

a ——等效椭圆长轴 (5.3)	I_o ——特征谱线光强度 (3.3); β 射线强度 (4.1)
a_t ——白噪声 (6.1)	I_s ——磨损烈度指数 (5.4)
A ——吸光度 (3.3); 原子量 (4.1); 面积 (5.3)	I_ζ ——磨粒区域绕 ζ 轴的二阶矩 (5.3)
b ——伯格向量 (2.3); 等效椭圆短轴 (5.3)	I_η ——磨粒区域绕 η 轴的二阶矩 (5.3)
C ——系数 (2.1); 浓度 (3.3); 重量比浓度 (4.2)	k ——常数; 微粒材料的磁化率 (3.2); 换算系数 (3.3)
C_D ——综合参数 (5.5)	K ——常数, 斜率 (3.3)
C_j ——置信度 (7.1)	K_b ——抛光的无量纲系数 (2.3)
C_v ——磨粒区域的凹度 (5.3)	K_r ——灵敏度 (4.1)
d ——环形间隙的直径 (4.2)	L ——在磨屑上的载荷 (2.3); 敏感区厚度 (4.1); 间隙长度 (4.2)
D ——浓度 (1.4); 微粒直径 (3.2); 重量比浓度 (4.1); 油缸直径 (4.2); 磨粒的等效圆面积直径 (5.3); 分形维数 (5.3)	L_n ——线性度 (5.5)
D_L ——大颗粒的读数 (5.4)	m ——矩 (5.3)
D_M ——临界尺寸 (5.4)	M_i ——矩特征 (5.3)
D_p ——散度 (5.5)	P ——概率 (2.1); 材料强度 (2.3)
D_s ——小颗粒的读数 (5.4)	p_A ——面积百分比分布 (5.4)
E ——粒子能量 (4.1)	p_g ——汽泡的内压力 (8.1)
E ——弹性模量 (5.4)	p_l ——汽泡的外压力 (8.1)
E_m ——粒子最大能量 (4.1)	PM ——大磨粒相对数量 (5.4)
F ——推力 (4.2)	p_N ——数量百分比分布 (5.4)
F_d ——油流的拖动力 (3.2)	Q ——流量 (4.2)
F_g ——重力和浮力的合力 (3.2)	r ——液、固密度比 (4.1)
F_m ——磁场力 (3.2)	R ——粒子射程 (4.1)
g ——重力加速度 (3.2)	R_d ——磨粒的圆度 (5.3)
G ——剪切模量 (2.3); 体积比浓度 (4.1)	r_o ——汽泡半径 (8.1)
h ——厚度 (2.3)	R_{AL} ——粒子在铝中的实际射程 (4.1)
H ——磁场强度 (3.2); 压痕硬度 (5.4)	R_{ij} ——自协方差函数 (7.1)
I ——特征谱线光强度 (3.3); β 射线强度 (4.1)	R_t ——磨粒的长/短轴比 (5.3)
	s ——活塞位移 (4.2)
	S_i ——第 i 个特征量 (5.4)
	S_{max} ——活塞行程 (4.2)
	t ——时间变量; 时间坐标; 接触斑点的作用次数

T ——透过率 (3.3)	ε ——润滑系统中的磨粒损耗率 (1.4)
t_0 ——使材料破坏的最小作用次数 (2.1)	η ——粘度
T_i ——第 i 个特征量 (5.4)	φ ——自回归系数 (1.4); 夹角 (5.3)
V ——磨粒的体积 (2.3)	φ_i ——自回归系数 (6.1)
V_G ——气相体积 (4.1)	μ ——泊松比 (2.3);
V_L ——液相体积 (4.1)	线性吸收系数 (4.1)
V_S ——固相体积 (4.1)	μ_m ——质量吸收系数 (4.1)
W ——磨损量 (2.1)	v ——速度 (3.2)
W_G ——气相的相对重量 (4.1)	v_T ——微粒沉降速度 (3.2)
W_L ——液相的相对重量 (4.1)	θ_i ——滑动平均系数 (6.1)
W_S ——固相的相对重量 (4.1)	ρ ——自相关函数 (5.2);
x ——变量; 坐标;	密度 (3.2; 4.1)
润滑系统中的磨粒生成率 (1.4)	ρ_o ——油液的密度 (4.2)
X ——滑动的总路程 (2.3);	ρ_p ——微粒的密度 (3.2)
油层垂直高度坐标 (3.2)	ρ_L ——液相密度 (4.1)
x_0 ——设计的间隙量 (4.2)	ρ_S ——固相密度 (4.1)
x_p ——微粒在试样中离基片的高度 (3.2)	ρ_{AL} ——铝的密度 (4.1)
Z ——原子序数 (4.1)	σ ——表面张力 (8.1)
z_p ——微粒在基片的沉积位置 (3.2)	σ_f ——摩擦应力 (2.3)
α ——Weibull 分布的形状参数;	σ_r^2 ——模型残差 (6.4)
衰减系数 (4.2)	σ_T^2 ——模型残差 (6.4)
β ——Weibull 分布的位置参数;	τ ——时间常数 (1.4)
基片与垂直方向的夹角 (3.2)	Δ ——采样间隔 (1.4)
δ ——油流膜在基片上的最大高度 (3.2);	
Weibull 分布的最小位置参数	

目 录

概 论.....	(1)
0.1 发动机诊断技术的发展背景与作用	(1)
0.2 发动机诊断技术的主要任务与方法	(3)
0.3 发动机故障诊断技术的应用状况与发展趋势	(4)
第1章 机械磨损的系统分析.....	(7)
1.1 摩擦系统	(7)
1.2 磨损状态监控与磨损故障诊断	(8)
1.3 发动机典型的润滑系统	(8)
1.4 润滑系统中磨粒的动态分析	(11)
第2章 颗粒摩擦学.....	(15)
2.1 磨损过程分析	(15)
2.2 磨损失效分类与磨损原理	(17)
2.3 关于磨屑形成的理论	(19)
2.3.1 薄层状磨粒的形成	(19)
2.3.2 球粒的形成	(20)
2.3.3 剥块的形成	(20)
2.4 磨粒的分类与信息特征	(21)
2.4.1 磨粒分类	(21)
2.4.2 磨粒的形态特征	(22)
2.4.3 磨损故障的可诊断性	(23)
第3章 磨损监测技术原理.....	(25)
3.1 滑油监测技术概论	(25)
3.2 铁谱监测技术	(28)
3.2.1 铁谱技术原理	(28)
3.2.2 分析式铁谱仪	(31)
3.2.3 直读式铁谱仪	(33)
3.2.4 旋转式铁谱仪	(34)
3.3 光谱分析技术	(35)
3.3.1 原子发射光谱	(36)
3.3.2 原子吸收光谱	(38)
3.3.3 红外光谱	(42)
3.4 DMAS 铁谱分析系统.....	(44)
3.4.1 真空滤膜式铁谱仪	(44)
3.4.2 自动扫描显微镜	(46)
3.4.3 计算机辅助视觉系统	(46)
3.4.4 DMAS 软件系统.....	(47)
3.5 其它监测技术简介	(47)

第4章 在线监测系统.....	(49)
4.1 β -监测器及其在线监测系统.....	(49)
4.1.1 基本原理.....	(49)
4.1.2 系统组成.....	(52)
4.2 滑阀式液压污染粒子监测器.....	(53)
4.2.1 监测器原理与系统组成.....	(53)
4.2.2 监测器性能.....	(55)
4.3 发动机机载碎屑探测器.....	(57)
4.3.1 普通磁性碎屑探测器.....	(57)
4.3.2 信号式磁性碎屑探测器.....	(58)
4.3.3 信号式油滤.....	(59)
4.4 在线式铁谱仪.....	(61)
第5章 磨粒形态学图像分析.....	(63)
5.1 图像处理与分析基础.....	(63)
5.1.1 图像及其数据结构.....	(63)
5.1.2 图像预处理.....	(64)
5.1.3 图像边缘提取与分割.....	(65)
5.2 磨粒纹理分析.....	(67)
5.2.1 磨粒的纹理自相关函数.....	(67)
5.2.2 傅里叶变换纹理分析.....	(68)
5.2.3 灰度共生矩阵纹理分析.....	(69)
5.3 磨粒形态分析.....	(70)
5.3.1 区域内部变换的矩方法.....	(70)
5.3.2 磨粒整体形状的结构分析.....	(72)
5.3.3 磨粒整体形状的区域内部空间域分析.....	(73)
5.3.4 磨粒图像的分形参数描述.....	(75)
5.3.5 磨粒测量实例.....	(78)
5.4 磨粒尺寸的统计分布.....	(79)
5.4.1 有关统计研究的样本.....	(79)
5.4.2 Weibull 模型及其参数估计.....	(80)
5.4.3 一般规律.....	(85)
5.4.4 尺寸模型的应用研究.....	(87)
5.5 磨粒形态的统计分析.....	(89)
5.5.1 形状统计分布.....	(89)
5.5.2 特征磨粒的形状统计分析.....	(90)
5.5.3 在故障诊断中的应用研究.....	(93)
第6章 磨损过程监测的时序分析.....	(96)
6.1 时间序列模型.....	(96)
6.1.1 基本单变量模型.....	(96)
6.1.2 多变量模型.....	(97)

6.2 时序建模方法	(98)
6.2.1 经典方法	(98)
6.2.2 建模方法的改进	(98)
6.3 时序方法在磨损过程监测中的应用	(102)
6.3.1 建模算法	(103)
6.3.2 过程监测	(103)
6.3.3 过程诊断	(104)
6.4 趋势预测技术	(105)
6.4.1 平稳序列预报	(105)
6.4.2 非平稳序列的自适应 AR 模型预测	(106)
6.4.3 含确定性趋势项的组合时间序列预报	(107)
第7章 磨损故障诊断方法	(108)
7.1 磨粒识别与故障诊断	(109)
7.1.1 磨粒的参数化与分类标准	(109)
7.1.2 磨粒识别与故障分类诊断	(110)
7.1.3 有关诊断标准	(113)
7.2 基于规则的知识系统	(114)
7.3 发动机磨损类故障的例行检查方法	(121)
7.3.1 磁性碎屑探测器和过滤器故障检查程序	(121)
7.3.2 润滑油的检查	(125)
7.3.3 润滑系统故障定位程序	(125)
第8章 监测实验研究	(128)
8.1 齿轮(箱)在线监测实验研究	(128)
8.1.1 齿轮传动失效分析	(128)
8.1.2 齿面汽化现象研究	(129)
8.1.3 实验条件与监测方法	(132)
8.1.4 监测实验研究	(133)
8.2 航空发动机监测研究	(139)
8.3 船舶柴油机状态监测	(147)
参考文献	(152)
致 谢	(154)

概 论

机械故障诊断技术是有关设备运行、维护的一项新兴技术。在过去的十几年里，随着很多前沿相关科学技术成果的发展和渗透，特别是随着计算机技术的突飞猛进，机械故障诊断从方法到手段都有了很大的发展，诊断技术具有了前所未有的应用价值和可推广性。各行各业由于机械故障诊断技术的应用，不但有效地防止了很多重大事故的发生，而且，也取得了巨大的经济效益和社会效益。

机械故障诊断技术是一门多学科交叉并向多学科渗透，有着多领域专家参加、学术思想活跃，促进多门古典学科翻新并形成新的生长点的新型科学。当前，振动力学、摩擦学、设备管理、维修工程、可靠性工程、安全系统工程、机械学和其它学科由于机械故障诊断技术的全面发展和广阔前景，纷纷从各自的角度出发，将机械故障诊断技术置于自己的学科领域之中。然而，不得不承认，机械故障诊断技术正在逐步成为机器学中的一门独立学科。各门学科的渗透，改变的只是它的方法和手段，而机械故障诊断技术的根本目的将是始终不变的，那就是要获得并解释机器运行状态的信息，从而保证机器的正常运行并指导维修，减少或消除事故。毋庸置疑，随着机械故障诊断技术及其相关科学的发展，机械故障诊断技术对国民经济的作用将会越来越大。

0.1 发动机诊断技术的发展背景与作用

机械故障诊断技术最初是60~70年代在航空、航天和核能工程开始的。进入80年代，世界各国航空事业的发展速度十分迅猛，随之带来的安全问题也越来越突出。据国际民航组织的统计（见表0-1），1988~1993年的6年间，世界民航定期和不定期航空运输共发生279起飞行事故，死亡人数6646人，平均每年发生46.5起飞行事故，死亡1108人。1994年全球空难死亡人数1385人，比1993年的死亡人数增加25%。航空事故率正呈逐年上升趋势，形势非常严峻。这些事故不但造成了重大的人员伤亡，而且也造成了巨大的经济损失和社会影响。

表0-1 1988~1993年世界民航飞行事故统计

年 份	1988		1989		1990		1991		1992		1993	
灾难情况	次数	死亡人	次数	死亡人	次数	死亡人	次数	死亡人	次数	死亡人	次数	死亡人
定期客运航班	15	633	12	644	9	283	9	434	9	929	10	487
不定期客运航班	4	84	7	418	3	28	3	295	3	90	3	266
地区、通勤航班	16	218	20	321	13	242	19	315	19	281	20	173
非客运航班	19	72	12	47	10	58	18	133	13	91	13	84
共 计	54	1 007	51	1 450	35	611	49	1 177	44	1 391	46	1 010

飞机发生事故或全损失事一般有人、机械和环境等多方面的原因（见表0-2）。国际民航组织的调查表明，由于单一主要原因发生的事故约占28%；有两个主要原因的占54%；多个主要原因的占18%。

在机械因素方面，虽然现代飞机设计技术和可靠性已日臻完善，机械因素导致的飞行事故仍占有很高的比率。以飞行安全最坏的1992年为例：在全损事故的26起中，人为因素占56%，机械因素27%，环境因素20%；在重大损伤事故的28起中，人为因素占47%，机械因素33%，环境因素20%；在严重事故征候的16起中，人为因素占14%，机械因素42%，环境因素44%。从大量的统计资料中可以看出，因机械故障原因造成事故的比例一般在25%~30%左右。

表0-2 1988~1993年世界民航飞行事故原因分类

年 份	1988	1989	1990	1991	1992	1993
机组责任或操作失误	31	34	12	10	12	31
空 管 责 任	0	2	1	2	0	1
天 气	21	7	8	10	14	16
发动机失效、失火	5	6	7	7	5	6
飞机结构和系统故障	1	5	3	7	7	3
可控飞机撞地	11	15	8	8	5	11
人 为 破 坏	2	2	0	1	1	
劫 持	3	1	1	2	0	0
击 落	2	1	1	2	0	0

从表0-2可以看出：在造成各类飞行事故的诸机械因素中，发动机是关键，6年间由于发动机起火、叶片故障、发动机脱离机翼等原因而发生的飞行事故达34起。

军用航空的飞行事故一般比民用航空高得多，发动机的故障也是威胁飞行安全的首要问题。以国内某军区所属空军1965年~1985年共20年的统计数据为例：20年内，共发生各类等级事故194起，其中因机械故障因素造成的有57起，占29.4%。在这57起事故中，属于发动机的占44.7%，比例最高。其它的依次为着陆系统（10.5%），座舱盖（10.5%），炮弹炸膛（7.9%），电源线路（7.9%），操纵系统（7.9%），减速伞（5.3%），液压系统（2.6%），其它（2.6%）。

对于船舶、机车等大型运输工具，柴油机则是保障其安全运行的动力心脏。目前柴油机的维护保养仍然沿用定期维修方式，即通过不同级别的维护保养如拆卸、检修、调整、更换、修复和试车等手段，使柴油机经常保持良好的运行状态的。根据对船舶故障的统计分析，柴油机的故障约占60%~70%。为了最大限度地提高柴油机的利用率和节省维修费用，开展以视情维修方式目标的柴油机故障诊断技术的研究和应用，也是维修体制改革的重要内容。

在工业生产中，由于科学技术发展的突飞猛进，和过去五六十年代相比，出现了一个崭新的面貌。为了最大限度地提高工业生产率，工业生产迅速全面地朝着大型化、自动化方向发展，机械设备的组成和结构也越来越复杂、精密。这些发展大大地提高了经济效益，但另一方面，也带来了问题：万一驱动生产线的动力系统——动力装置及动力传输机械发生故障，造成的经常损失和人员伤亡往往也是不堪设想的。

由此可见，发动机运行使用过程中的安全性、可靠性要求和开展视情维修方式的需要，促使了发动机各种诊断技术的发展。而发动机故障诊断技术的作用却又不仅局限如此。概括起来，发动机故障诊断技术研究的目的可以归结为以下几个方面：

- (1) 保障发动机使用过程中的安全性和可靠性，防止突发机械事故；
- (2) 最大限度地减少发动机的分解次数和范围，保持运动精度，合理延长使用寿命；
- (3) 指导发动机的视情维修，降低维修费用，提高利用率。

0.2 发动机诊断技术的主要任务与方法

机械故障诊断技术的根本目的是获得并解释机器运行状态的信息,从而保证机器的正常运行并指导维修,减少或消除事故,其主要任务应该包括以下四个层次:

(1) 第一层次是捕捉发动机异常征兆的任务,即状态监测任务。状态监测是故障诊断技术中最基本的内容,其目标是要对发动机整机或单元体的当前状态是否完好和能否使用作出结论,因此要求对异常信息的检测尽量作到适时化或机载化。

(2) 第二层次的任务是在发现发动机异常征兆后确定发动机中产生故障的零部件及其故障性质,即故障诊断任务。这是故障诊断技术的核心内容,其目标是要对发动机各零部件的故障状态作出结论,达到指导维修的目的。要实现这一任务,监测的参数一般要求比较多,采用的方法和手段也不能是单一的。外场监测实践表明:监控20~100个发动机的参数,就能够客观地评定发动机功能的正确性和工作能力以及确定其诊断深度达到部件级的发动机的完好性。但要求诊断深度达到个别零件级的技术状态时,需要监测分析的参数一般要求达到200~1000个以上。因此,一般要采取综合的监测手段与复杂的诊断分析技术。

(3) 第三层次的任务是预测任务。其目的是确定发动机或零部件的安全使用期和预防性维修的完成期限。实现这种任务目前有很多的数学预测方法可以采用,但其困难在于整机及零部件质量衰变模型的确定。

(4) 第四层次的任务是研究事故的起因,即对发动机过去某一时刻所处状态的回顾分析,为事故调查提供依据。这一方面的工作目前主要依据数据的译码分析和残骸分析来完成。

目前,发动机故障的监测、诊断技术和方法概括起来有以下两类:

(1) 系统故障监控技术

为了确保其产品运行的可靠性与安全性,各种机型的航空发动机或飞机生产厂商都提供了一定的机载监视设备和手段。如数字式飞行数据记录器及其译码设备、DFDRU、EICAS、AIDS以及俄制(俄罗斯生产的)发动机的滑油磁性碎屑信号系统,等等。系统故障监控技术中的硬件开发任务一般只能由生产厂商完成;留给用户开发和应用的只有以下两个层次的任务:

(a) 系统功能适时监视:一般由机组人员完成。

(b) 系统性能衰变监测:这一方面的工作是建立在已有机载监视设备所能提供的状态信息和准确的发动机热力学数学模型的基础之上的,包括以下两方面的工作:一方面是运用发动机公司提供的通用软件进行有效的分析,如GE公司的ADEPT软件、R·R公司的COMPASS软件、P&W公司的ECM II 等等。另一方面的工作则是针对特定机型的诊断逻辑、方法及其软件的开发或已有软件系统功能的扩展。

对于船舶柴油机,系统故障监控技术主要依靠热工参数分析方法。一些船舶上面也采用了类似于航空的“黑匣子”。

(2) 零(部)件故障监测与诊断技术

根据目前航空技术的发展水平,无论飞机还是发动机,其零(部)件工作状态都没有置于机载监视系统的直接监视之下,大部分零(部)件只能根据其额定寿命,通过可靠性分析,以定期更换的方式对其故障加以控制。对于关键零(部)件则要求实施以下两类监测措施:

(a) 检视探伤技术

这是在不拆卸的情况下,通过探伤、窥视等方法对发动机裸露零(部)件的裂纹、烧蚀、

变形、破损等表层缺陷所采取的直观监视技术。采取的方法主要是无损探伤技术，如磁力、涡流、超声、声发射、射线、光学孔探、红外热像等方法。

(b) 监测诊断技术

对于发动机旋转类零（部）件，由于非拆卸情况下无法对其进行直观的检测，因此，目前国内外主要通过滑油（包括液压油、燃油）分析和振动分析对其运行状态实施监测、诊断。前者主要针对有润滑介质的磨损类故障，后者主要针对转子系统或旋转零件的故障。

0.3 发动机故障诊断技术的应用状况与发展趋势

航空发动机早期的监测主要是驾驶员或领航员的手稿记录，目的用于飞行试验。后来的飞行记录主要由飞行记录装置完成，记录的适航性数据也扩大到了性能的监测和事故的研究。数据记录装置记录有发动机的一些运行参数，通过地面译码设备译码后，可用于发动机的性能趋势监测。最早要求在大型民航机上装备可靠的抗摔坏性数据记录装置的立法，是于1958年8月在美国首先生效的，随后法国和澳大利亚也提出了类似的要求。英国在1965年把这项要求变成了强制性的法规。

随着大规模集成电路和微型计算机的发展及其在民航飞机上的广泛应用，使得装在驾驶舱的仪表设备不断更新换代，飞机公司的飞机数据集成系统（AIDS）也得到了迅速的发展，为发动机和飞机系统的监测发挥了重要作用。以B747的飞机数据集成系统为例，AIDS包括了飞行数据探测单元（FDAU）、飞行数据输入仪表板（FDEP）、数据管理单元（DMU）、4min回路记录器（LR）、数字式飞机集成系统记录器（DAR）和数字式飞行数据记录器（DFDR）。监测的发动机参数有：低压压气机的总排气压力、总排气温度、转速，高压压气机的总排气压力、总排气温度、转速、油内温度、发动机压气比、通气装置的压力、燃油流量、机油压力、排气温度、透平冷却空气压力、机内温度、可变定子角、排气流量、功率能级角、油量、发动机振动（两个部位）以及起动空气压力等20多个状态参数。美国通用电器公司为洛克希德C-5型飞机生产了C5A故障检测的分析记录系统（MADARS），用在了TF39-GE-1发动机上。

70年代末期，发展了应用彩色显示、全数字微机控制的所谓第五代电子显示仪表，随即也出现了发动机指示和机组警告系统EICAS。EICAS具有全程监控和多种显示功能，对发动机和飞机各系统进行连续监控和显示。具备信息储存功能，供地面维护人员调用，作为排除故障的参考，从而很容易对系统和部件进行故障诊断。EICAS问世以来，已在新型飞机上得到了广泛的应用。

由于行业特点，如何利用飞行数据记录装置提供的信息，全面、准确地了解发动机的运行状态，是航空公司可靠性管理工作的重点内容之一。目前，这方面的工作主要靠数据统计分析和趋势分析软件系统来完成。基于飞行数据记录装置的译码信息对发动机进行性能趋势分析的计算机软件有GE公司的ADEPT、R·R公司的COMPASS、P&W公司的ECM II以及国内改进的EMD等。

中国民航总局将航空发动机的状态监测和故障诊断技术作为保障航空安全的重要手段列入了中长期科技发展规划中。中国民航学院、北京航空航天大学 and 东方航空公司等单位完成了EMD的开发；西南航空公司和上海交通大学合作，开展了发动机振动监测诊断的研究工作；南京航空航天大学和南方航空公司、通用航空公司、新疆航空公司等单位合作，开展了欧美制和俄制等多种机型的发动机滑油监测技术研究。

根据新疆航空公司等单位的经验,采取有效的滑油监测分析手段,预报发动机零件的磨损故障,视情安排部件更换时间,是降低发动机空中停车率,保障飞行安全的有效手段。他们在发动机的使用过程中,严格按照1418-B V-A B通告规定,定期对发动机滑油中的金属屑进行抽样送检,摸索了一套成功的经验。当铁含量达到1.5ppm[克/吨]或铜含量达到2ppm时,要对发动机进行“特殊检查”。对执行“特殊检查”的发动机在滑油分析报告没有出来之前,飞行允许不超过25h。当金属含量达到任意项极限值时[铁8.0,铜3.0,钛1.0;单位:ppm]时,规定发动机停止使用。通过滑油监测手段,新疆航空公司已多次成功地进行了D-30KV发动机的性能预测,空中停车率逐渐下降,在1995年度还杜绝了空中停车的事故征候。

通用航空公司、西南航空公司和西北航空公司也开展了滑油监测工作。通用航空公司多次预防了D-36发动机的磨损故障,取得了很好的效益。西南航空公司也通过开展发动机的监测和可靠性管理工作,保持了良好的安全记录。

AMECO是民航开展滑油分析工作最早的单位,专门建立了中心实验室,为国际航空公司长期良好的安全状态作出了贡献。

航空工业总公司所属第370厂及第608研究所等单位,与南京航空航天大学合作开发了DMAS铁谱分析系统和原子吸收光谱分析系统,对几个型号的军用发动机进行状态监测,取得了明显的效益。另外,第132厂、511厂、331厂、606研究所等单位引进滑油监测设备,先后开展了这方面的工作。

在船舶运输行业,中国船际社和长江航运(集团)总公司已就柴油机和尾桨的监测工作立法。南京长江油运公司和南京航空航天大学、武汉交通科技大学等单位合作,对船舶柴油机先后实施了滑油监测和振动监测,并建立了以DMAS铁谱分析系统为基础的专业化的监测基地。

目前,发动机故障诊断技术已越来越受到各方面的重视,也越来越实用化了。而现代科学技术的发展,各种新型传感器和测试技术的出现,信号分析手段的增多和完善,特别是计算机技术的高速发展,也为发动机故障诊断技术的发展提供了良好的契机。可以预见,未来几年发动机故障诊断技术将在以下几个方面取得令人振奋的发展。

(1) 随着各种诊断技术的不断发展,特别是发动机厂商机载监控系统的不断完善,可获取的状态信息将会越来越丰富,可利用的先进监测设备也会越来越多。因此,一个以技术组合和信息集成为主要目标的高集成水平诊断系统的研究与开发将在一些行业,特别是信息管理基础较好的民航取得重大进展。

(2) 诊断技术将由过去单纯的监测、诊断向今后的监测、诊断、维修管理、放行的集成化方向发展,监测、诊断直接服务于发动机的维修、管理乃至参与决定发动机的放行,全面实现发动机的视情维修和视情使用。

(3) 随着企业管理办公自动化的实现,诊断技术的发展也必将向工程网络系统过渡,并入企业的信息管理网络,这将极大地促进企业设备管理的现代化和提高安全(或可靠性)管理水平,并最大限度地发挥诊断系统的效能。

(4) 诊断技术是一门实用性很强的技术,最终都要落实到诊断仪器上才能得以实现,因此,成本低、可靠性高、适应面宽的各种诊断仪器是今后诊断技术开发的重点方向之一。由于机械故障一般都要经过一个衰变过程才能最终引发事故,因此许多机械设备事实上并不需要装备复杂的在线式或机载式监测诊断系统,而只需要定期在某些关键部位进行检测或抽样分析,就能保证设备的安全运行。而且,对于一些发动机特别是航空发动机,由于受到诸如

适航等各种客观因素的限制，有时安装机载监测设备是非常困难的。因此，专门化的定期监测、诊断仪器有很大的应用前景。而对于通用化的监测、诊断仪器，则必须针对行业特点，建立适用的监测、诊断标准，这是推广应用的前提条件。

(5) 由于发动机的大型化、复杂化和高度专业化，因此，诊断系统或仪器的智能化仍将是今后的主要发展趋势。由诊断技术开发专家和发动机领域专家的通力合作，专家系统、神经网络、模糊诊断等各种智能诊断方法仍将是今后的研究热点。

第1章 机械磨损的系统分析

机械磨损是相互接触的物体在相对运动时表层材料不断发生损耗的机械表层损伤过程。

磨损不但是机械零件表面材料消耗的主要原因，也是导致各种破坏事故，影响机器使用寿命的重要因素。在英国、日本和德国等高度工业化国家，每年约有20亿美元是由于磨损过程而损失掉的。克拉盖尔斯基等深入研究机器和机构的损坏原因后发现：有75%是因为磨损直接或间接引起的。

1.1 摩擦系统

磨损是伴随摩擦而产生的必然结果。按照霍斯特·契可斯（HORST CZICHOS）的摩擦系统分析观点，各种机械摩擦系统的功能，基本上是把输入变换为技术上有用的输出。从系统的外部看，可以把摩擦系统看作图1.1-1所示的有输入和输出的机械系统，输入和输出在功能上的因果关系是带有机械能和材料损耗输出的。

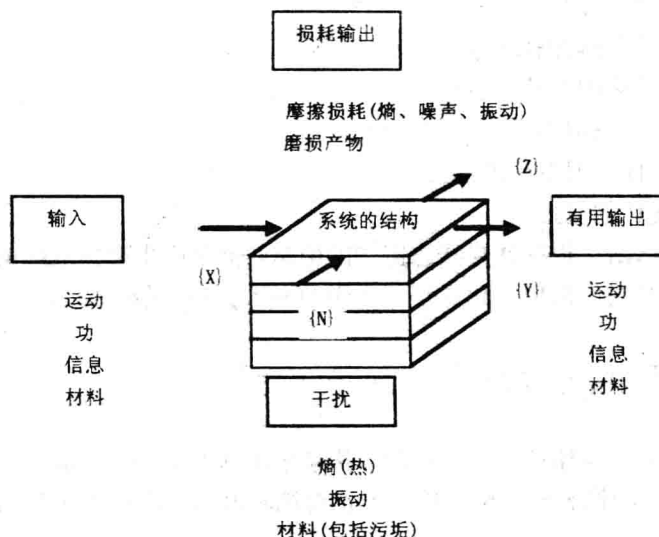


图1.1-1 机械摩擦系统说明

系统的结构包括：

- (1) 系统的元素 系统的基本元素包括摩擦元素（零件）、润滑剂和周围环境。
- (2) 元素的性能 摩擦元素的整体性能和表面性能、润滑剂的性能及周围环境的性能。
- (3) 元素的相互关系 各元素之间的相互作用包括接触过程、摩擦过程、磨损过程及润滑作用等各个方面。

摩擦系统的技术功能包括运动传递或引导、信息的产生或再现、功和功率的传递、以及材料的运送、成形或加工。

工作变量包括两摩擦元素之间的相对运动形式（滑动、滚动、自旋、冲击）、载荷、速度、温度、运动距离以及工作时间。

摩擦学特征包括摩擦引起的系统结构的变化（系统内元素的破坏或新元素的产生、元素性能的改变、元素间相互关系的改变）、能量的损耗以及材料的损耗。

1.2 磨损状态监控与磨损故障诊断

根据摩擦系统的分析方法，可以定义贯穿本书的几个概念。

(1) 磨损状态 指摩擦系统内元素的性能、相互关系及系统的技术功能。

(2) 磨损故障 指摩擦系统的结构（或其元素）在规定的条件（工作变量）下丧失了预定技术能力的摩擦学特征。

(3) 失效 失效与故障没有本质的差别，这里特指系统内元素不可修复的故障。

(4) 磨损状态监控 就是通过对系统摩擦学特征的测量、分析和反馈的技术手段和方法，保持系统内元素的性能、相互关系及技术功能。磨损状态监控包括对摩擦系统的功能变化的监控和结构变化的监控两大类方法。

摩擦系统功能变化的监控，包括：

① 摩擦力和摩擦变化的监控；

② 噪声和振动变化的监控；

③ 热发射和温度变化的监控。

摩擦系统结构变化的监控，包括：

① 润滑剂品质和润滑作用变化的监控；

② 机械零件表面状况变化的监控；

③ 磨损产物变化的监控。

(5) 磨损故障诊断 根据磨损状态监测的信息，推断产生磨损故障的元素（故障定位）、性质（磨损类型及其损伤机理）和作用（产生的原因及对系统的影响）。

1.3 发动机典型的润滑系统

发动机都是在高温高速环境下工作的，其摩擦零部件承受较大载荷。因此，需要有较好的润滑条件。航空发动机和船舶柴油机一般都有循环润滑、冷却系统为轴承、齿轮和花键提供润滑和冷却。

图1.3-1是RB211-535C航空发动机的内储式循环润滑系统简图。

润滑系统由内储式油箱、加压泵、清洁（抽油）泵、加压过滤器、清洁（回油）过滤器、通过燃油提供冷却的冷却器（F.C.O.C.）、溢流阀、旁路阀、磁性碎屑探测器（M.C.D.'s）以及滤清器等组成。

润滑油从发动机内储式油箱经过纱滤和供油管由加压泵送入加压过滤器作初级过滤。而后，滑油通过油管被输送到冷却器（F.C.O.C.）进行冷却，最后分成两路输送到各润滑部位。