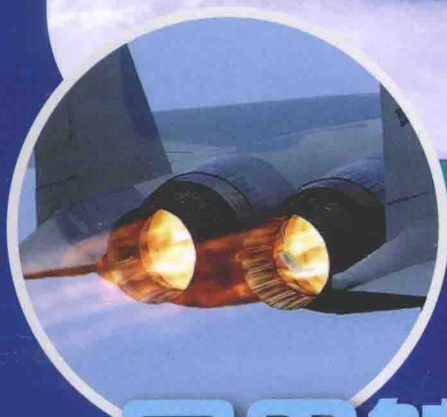




主编 柳迎春 李洪伟 李明

军用航空发动机 状态监控与故障诊断技术



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军用航空发动机 状态监控与故障诊断技术

主 编 柳迎春 李洪伟 李明

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书建立了军用航空发动机状态监控与故障诊断技术的完整理论体系和框架,全面论述了军用航空发动机在状态监控与故障诊断中的基本概念、信号获取、信息分析和故障诊断。内容做到全面翔实,强调理论并突出应用。

全书共分五章,包括概论、航空发动机状态信号的获取、航空发动机状态特征信号的处理与分析、航空发动机状态的识别、航空发动机常见故障模式及机理等内容。书中介绍了状态监控和故障诊断实用的研究成果和经验,并吸纳了国内外的相关资料,为军用航空发动机状态监控与故障诊断水平提高提供理论基础和技术指导。

本书可作为飞机与发动机维修专业的教材,也可供从事军用航空发动机设计、制造、论证的专业技术人员参考,也可作为军用航空发动机使用、维修和管理的工程技术人员的专业培训教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

军用航空发动机状态监控与故障诊断技术/柳迎春,李洪伟,李明主编. —北京:国防工业出版社,2015.3

ISBN 978-7-118-09912-6

I. ①军... II. ①柳...②李...③李... III. ①军用飞机—航空发动机—监视控制②军用飞机—航空发动机—故障诊断
IV. ①V271.4②V263.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第017983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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18½ 字数 420千字

2015年3月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 58.00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

《军用航空发动机状态监控与故障诊断技术》 编审委员会

主任委员 王小平

副主任委员 陈震 金平

委员 赵钧 刘晖 沈利军 高明
杜百强 黄飞 任剑

主编 柳迎春 李洪伟 李明

编者 蔡娜 谢镇波 王斌 于晓琳 于海滨

主审 高明 陆怡

前 言

军用航空发动机工作的安全可靠,直接关系到战斗任务是否能够完成,国家财产是否会受到损失,人员的安全是否能得到保障。

生、老、病、死是世界万物的自然规律,航空发动机也不例外。形象地说,航空发动机在整个寿命期间,能否少生病,能否减缓衰老,提高在有限时间内的工作质量,这就是摆在航空发动机保障者面前的难题。而航空发动机状态监控与故障诊断技术,则是解决这个难题的重要手段和方法。

本书阐述了军用航空发动机状态监控与故障诊断技术的基本概念和主要任务。首先对状态监控与故障诊断的基本概念作一解释。因为状态监控与故障诊断是一个不断认识和提高的过程。所以,只有得到大家普遍认同的概念和理论,在执行状态监控与故障诊断的过程中才不会出现偏差。其次,对航空发动机状态信号的获取、航空发动机状态特征信号的处理与分析、航空发动机状态的识别等方面作了详细分析。最后,落实到对军用航空发动机常见故障模式及机理的分析上。

军用航空发动机状态监控与故障诊断,依赖于可靠性、系统安全性、管理学,以可靠性为中心的维修(RCM)以及系统科学、航空发动机原理、结构完整性等基础理论,依靠包括传感器、计算机、数据传输和处理、建模、专家系统、决策支持等技术的支撑,按照发动机设计和试验验证的性能指标、主要参数建立监控“基线”,根据使用要求确定控制参数的偏差或准则,通过模型或专家系统诊断给出维护检查建议,目的是在航空发动机出现故障之前,准确告诉使用或维护人员该做什么,并进一步为故障诊断服务。因此,军用航空发动机状态监控与故障诊断就是指借助于各种传感器、信号采集、信号处理和信息分析等技术和手段,对于来自航空发动机系统、设备、部件、组件或与航空发动机相关的外部数据或信号进行检测和观察,并通过人的参与判别航空发动机技术状态,制定决策,确定维修内容,以保证航空发动机使用安全的一门综合性学科和工程技术实践与管理。

军用航空发动机状态监控与故障诊断是一门实践性很强的技术,涉及的理论、技术、方法和手段比较多,因此,需要在理论上有所突破,技术上有进步,方法上有创新,手段上有改进,需要各方面的努力。由于时间仓促,编者水平所限,对于教材中存在的一些错误和不足之处敬请读者批评指正。

编 者

二〇一三年十二月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 状态	1
1.1.2 监控	2
1.1.3 故障	3
1.1.4 故障分类	4
1.1.5 故障模式	6
1.1.6 故障诊断	7
1.1.7 维修	13
1.2 状态监控与故障诊断的发展过程	16
1.2.1 早期的维修思想	16
1.2.2 以可靠性为中心的维修(RCM)理论基础	18
1.2.3 以可靠性为中心的维修(RCM)理念	20
1.2.4 RCM 与 MSG	21
1.2.5 视情维修工作	22
1.2.6 视情维修技术的分类	24
1.2.7 状态监控维修(CBM)的主要优缺点	25
1.2.8 状态监控维修的主要功能	26
1.2.9 国外预测与健康管理相关标准	27
1.2.10 航空发动机健康监控研究现状及发展趋势	28
1.3 小结	31
第 2 章 航空发动机状态信号的获取	32
2.1 概述	32
2.2 温度信号获取	33
2.2.1 热力学定律	33
2.2.2 温度的物理意义	34
2.2.3 温度的来源	37
2.2.4 热量的传递方式	40
2.2.5 温度测量方法概述	43
2.2.6 接触式温度测量	44
2.2.7 气流温度的测量	48
2.2.8 非接触式温度测量	52

2.3	压力信号获取	55
2.3.1	气流压力测量	56
2.3.2	压力测量元件	57
2.4	转速信号获取	60
2.4.1	接触式转速表	60
2.4.2	非接触式转速表	61
2.4.3	机械离心式转速测量元件	61
2.5	流量信号获取	62
2.5.1	容积型流量计	62
2.5.2	速度型流量计	63
2.5.3	质量型流量计	63
2.5.4	航空发动机控制系统中的流量测量元件	63
2.6	油液信号获取	65
2.6.1	磨损参数	65
2.6.2	污染参数	79
2.6.3	性能参数	81
2.6.4	小结	85
2.7	振动信号获取	86
2.7.1	振动测量的基本原理	86
2.7.2	测振系统及其分类	88
2.7.3	惯性式加速度传感器	89
2.7.4	速度与位移传感器	92
2.7.5	位移、速度和加速度之间的转换	94
2.7.6	振动传感器的选择与安装	95
2.8	声波信号获取	98
2.8.1	噪声诊断技术	98
2.8.2	超声波诊断方法	102
2.8.3	声发射诊断技术	106
第3章	航空发动机状态特征信号的处理与分析	110
3.1	基本概念	110
3.1.1	信息、信号与数据	110
3.1.2	数据处理	111
3.1.3	数据分析	112
3.2	信号的分类及描述	113
3.2.1	信号的分类	113
3.2.2	信号的描述	114
3.2.3	周期信号的频谱	115
3.3	信号测试的误差分析	121
3.3.1	绝对误差和相对误差	122

3.3.2	误差的表示方法	123
3.3.3	误差的合成	124
3.4	数据处理与分析常用工具	124
3.4.1	直方图	124
3.4.2	排列图	130
3.4.3	鱼刺图	132
3.4.4	散布图	133
3.4.5	统计分析表	135
3.4.6	控制图	136
3.5	数字图像处理与分析	144
3.5.1	基本概念	145
3.5.2	人眼的视觉特性	146
3.5.3	数字图像处理系统的组成	148
3.5.4	图像的数字化	149
3.5.5	数字图像的基本类型	152
3.5.6	图像处理技术研究的基本内容	154
3.5.7	图像特征提取与分析	155
3.5.8	图像匹配与识别	156
3.6	油液监控的分析技术	159
3.6.1	概述	159
3.6.2	油液分析数据处理的内容	159
3.6.3	油液分析中的界限值	160
3.6.4	油液分析的界限值制定原理和方法	164
3.6.5	光谱油液分析	167
3.6.6	铁谱磨粒的定量分析	170
第4章	航空发动机状态的识别	173
4.1	概述	173
4.2	航空发动机的状态特征参数	174
4.2.1	选择特征参数的原则	174
4.2.2	航空发动机的主要监控特征参数	175
4.3	性能参数的趋势分析方法	179
4.3.1	性能参数的预处理	179
4.3.2	基线模型的确立	181
4.3.3	偏差值的平滑处理	182
4.3.4	趋势分析	183
4.4	基于人工经验的状态识别	186
4.4.1	基本原理	186
4.4.2	状态识别举例	187
4.4.3	主要特点	187

4.5	模式匹配分析法	188
4.5.1	基本原理	188
4.5.2	模式匹配分析法举例	188
4.5.3	主要特点	188
4.6	模型分析法	188
4.6.1	基本原理	188
4.6.2	主要特点	189
4.7	油液光谱分析故障诊断方法	189
4.7.1	界限值法	189
4.7.2	各种方法的综合应用	191
4.8	故障树分析法	191
4.8.1	概述	192
4.8.2	建立故障树	196
4.8.3	故障树的简化	198
4.8.4	故障树的定性分析	203
4.8.5	故障树的定量分析	209
4.9	专家系统	212
4.9.1	专家系统概述	212
4.9.2	专家系统定义	213
4.9.3	专家系统的分类	214
4.9.4	专家系统的特征	215
4.9.5	专家系统的基本结构	217
4.9.6	专家系统的核心内容	218
4.9.7	专家系统的开发	223
4.9.8	开发实例	224
第5章	航空发动机常见故障模式及机理	238
5.1	基本概念	238
5.1.1	故障模式	238
5.1.2	故障原因	238
5.1.3	故障机理	238
5.1.4	故障严酷度等级	238
5.1.5	故障分类	239
5.2	性能故障	242
5.3	结构强度故障	244
5.3.1	压气机部件故障分析	246
5.3.2	主燃烧室部件故障分析	254
5.3.3	涡轮部件故障分析	255
5.3.4	加力燃烧室部件故障分析	260
5.3.5	轴承	260

5.3.6	转轴	265
5.3.7	机匣	268
5.4	附件系统故障	269
5.4.1	燃油控制系统	270
5.4.2	润滑系统	271
5.4.3	起动点火系统	276
5.4.4	传动系统	279
5.4.5	供电系统	282
参考文献		283

第1章 概 论

航空发动机是飞机的动力装置,其重要性不言而喻。随着新技术、新手段、新方法的不断涌现,大家总是想在航空发动机方面做些工作,尽可能地来提高航空发动机的工作能力。近年来,航空发动机的状态监控技术不断进步,故障诊断能力也日益提高。那么,如何做好航空发动机的状态监控工作,提升航空发动机的故障诊断和排除能力,是摆在外场工作人员面前的现实问题。

生、老、病、死是世界万物的自然规律,航空发动机也不例外。形象地说,航空发动机在整个寿命期间,能否少生病,能否减缓衰老,提高在有限时间内的工作质量,这就是摆在航空发动机保障者面前的难题。而状态监控技术,则是解决这个难题的重要手段和方法。

那么,什么是状态监控?如何做好状态监控?如何进行故障诊断?这是在学习航空发动机状态监控与故障诊断过程中,需要回答的问题。世界上的概念非常多,尤其是中文的词语,往往含有多义。只有对基本概念得到了正确的解释,才能理解概念所包含的意义,才可保证实际工作的质量。为了回答这些问题,下面先从基本概念入手。

1.1 基本概念

现代科学技术中,充斥着各种新名词、新概念,各种先进的理念也不断涌现。由于每个人的知识结构、成长经历及所接受的教育程度不同,对新概念的理解,往往是以自己的理解为切入点。这种情况造成的最大问题是:对于概念的名词,可能会存在不同的解读,对于实际工作来说,就会造成方向性的偏差。既然本书所讨论的是航空发动机的状态监控与故障诊断,首先从状态监控的基本概念入手。

1.1.1 状态

《新华字典》里面对“状态”的解释是:情形,状况。字典当中经常使用这样互训的方式来解释。从这个解释,还是无法知道状态的含义。而对状况的解释是:事情表现出来的情形。延伸到航空发动机的状态监控,通俗地讲,就是航空发动机所表现出来的情形,也就是航空发动机的技术状况。

航空发动机的技术状况可以分为三种:正常、异常和故障状态。

当发动机、发动机附件或工作系统(以设计目的表征的)功能指标或物理指标均处在规定的范围之内时称为正常状态,这时发动机可以完成规定的任务。一般认为处在正常状态的发动机没有缺陷或者虽有缺陷但在允许的限度之内(实际上某些缺陷几乎是不可避免的,例如燃烧室内火焰筒的局部裂纹)。

异常状态通常是一个相对的状态,这时发动机、发动机附件或工作系统的功能指标或物理指标相对其规定数值发生了偏差,但仍未超出规定的范围,如发动机推力下降、振动

量增加等,此时发动机尚可以完成规定的任务。异常状态一般是发动机由于某种缺陷已有一定的发展或出现了某种缺陷,此时发动机尽管可以完成一定的任务,但其功能指标与规定指标有着较大的偏差。

当发动机、发动机附件或工作系统的(以设计目的表征的)功能指标或物理指标低于(或高于)规定的最低(或最高)限制值时称为故障状态,这时发动机将无法完成规定的任务。故障往往是由于某种缺陷不断扩大,从异常状态进一步发展而形成的,但故障并不意味着失效。

发动机的状态是由其内在品质和外在环境条件共同决定的。由于内在品质或(和)外在环境的变化,必然导致发动机状态的变化。如果允许发动机一直使用下去的话,那么发动机随着使用时间的增加,必然会出现从正常状态经历异常状态而后发展为故障状态的状态演变过程。但是根据现行的发动机管理体制,实际上大量的航空发动机并未发展成异常状态或故障状态就进行了预防性维修或已经退役。

对发动机状态的合理划分,关系到航空发动机的安全性和经济性之间的平衡。没有发现已有的故障,而让发动机继续工作,将导致灾难性后果。但如果误判发动机发生了故障而进行发动机更换、大修,将导致经济上的损失。

1.1.2 监控

监控的含义包含两层意义:监测并进行控制。监测,就是从旁监察注视。而控制,就是掌控对象不使其任意活动或超出范围。

要判断航空发动机的状态,就需要进行监控工作。航空发动机作为航空装备,本身不会告诉你相关的信息。因此,需要通过可测量参数来反映其工作状态。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量或状态参数(一般在基本理论中称为状态量,在实施技术、装备中称为状态参数),通常这些参数中既包括了发动机的各种工作参数(如发动机转速、排气温度、振动等),也包括了专门的监控参数(如发动机转子跳动量、轴承噪声值、惯性运转时间等)。即使对于同一种型号的发动机,由于个体的差异和使用环境、使用方法的差异,状态量随着发动机的使用将形成一个连续或离散的随机(时间)过程,利用测量、记录设备(仪器)得到的这个随机过程的图形称为机械图像。

在中华人民共和国国家军用标准《GJB 2013A—1997 航空燃气涡轮动力装置术语和符号》3.1.2.4.39、3.1.2.4.41 和 3.1.2.4.44 中,对发动机监控相关的概念有明确定义:

3.1.2.4.39 发动机监控 engine monitoring

采集发动机各种性能和结构参数,并进行处理和换算,与基准数据或图征谱进行比较,记录现行性能及趋势比较的结果,必要时发出告警信号及采取安全保护措施。

3.1.2.4.41 发动机性能监视 engine performance monitoring

对发动机气路参数实行检测和趋势分析,报告发动机性能变化趋势,提供维修信息。

3.1.2.4.44 发动机状态监控 engine condition monitoring

发动机各部分工作情况的监测与监控。包括超转监控、超温监控、喘振监控、振动监控、失速监控、惯性时间监测、涡轮叶片表面温度监测、叶片—机匣间隙监测、推力或传递轴功率监测等。

GJB 2013A—1997 中对状态监控的定义,更多关注的是技术上对航空发动机所采取的措施,而没有考虑到人在其中所起的重要作用。要深入了解状态监控的意义,就需要了解一下,为什么要进行状态监控。

1.1.3 故障

中华人民共和国国家军用标准《GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语》“2.2 故障与失效”中,对故障概念有明确定义:

2.2.1 故障 fault/failure

产品不能执行规定功能的状态。通常指功能故障。因预防性维修或其他计划性活动或缺乏外部资源造成不能执行规定功能的情况除外。

2.2.2 失效 failure

产品丧失完成规定功能的能力的事件。

注:实际应用中,特别是对硬件产品而言,故障与失效很难区分,故一般统称故障。

在《GJB 2013A—1997 航空燃气涡轮动力装置术语和符号》3.1.2.5.1 和 3.1.2.5.2 中,明确了发动机故障和非发动机故障。

3.1.2.5.1 发动机故障 engine failures

发动机故障是经证实为造成发动机不具备规定功能的事件或不能工作的状态。为确定发动机的可靠性,发动机故障定义如下:

a. 由于发动机附件故障而不能达到或保持任一状态所要求的推力或功率。在飞行中某一推力状态出现的故障将构成影响测定该状态特性的故障。

b. 直接由于发动机的原因,迫使发动机停车或减小油门,致使发动机推力或功率下降超过正常要求值的 10% 称为发动机功率故障。如果由于发动机的原因引起发动机熄火,则熄火(即使又重新启动成功)包括在内。

c. 直接由于发动机的原因,在最初的 15min 内不能把发动机启动起来。

d. 滑油消耗量超过规定或根据飞行后测量的滑油量推断其会提前产生低滑油警告,由使用部门要求的可能最大连续飞行时间作为上述推断的根据。

e. 如果振动值超过允许的极限值而导致发动机修理或报废和更换时,该振动要算作故障。

f. 如果故障通过更换附件得到排除,即使换掉的附件在试验器上不能证明有故障,亦算作故障。

g. 为排除一个故障需要更换许多零件对于发动机算作一个故障。

h. 由于接头和连接管路的漏液量超过规定而引起的故障,要算作发动机故障。

i. 由于发动机故障迹象或即将发生故障的迹象造成的发动机停车。

j. 直接由于发动机的原因造成发动机零件超过规定的损伤(如破裂、烧蚀、变形等)容限。

3.1.2.5.2 非发动机故障 excluded failures

非发动机故障是经证实造成发动机不具备规定功能的事件或不能工作的状态,不是发动机故障造成的。非发动机故障定义如下:

a. 在运输、贮存、检查、维护、修理、安装、翻修和更换中,由于违反现行说明书或航空质量标准而引起的故障;

b. 发动机在超出型号规范规定的环境条件和时间循环极限下工作,或使用的燃油和滑油不符合规定要求而引起的故障;

- e. 主要故障原因不是由于发动机设计和质量问题(如外物损坏)引起的故障;
- d. 初次起动失败后,由于没有完成维护工作而造成在 2min 内再次起动的失败;
- e. 非发动机承包单位提供的设备故障,并且它不是由发动机所引起,发动机能提供型号规范规定的正常功能和界面要求;
- f. 不是发动机引起的污染,而是由于燃油系统污染超过规范规定的极限所引起的故障;
- g. 驾驶人员和空勤人员报告的故障,但不能为以后的调查、飞行或地面试验所核实;
- h. 未执行经使用部门批准的发动机设计更改和工作程序更改而产生的故障。

GJB 2013A—1997 中,明确了发动机的故障概念,也明确了故障的责任。比如,发动机被飞鸟击伤,打坏工作叶片,虽然引起了发动机发生故障,这不属于发动机故障。有时,又由于发动机耗油增大这类问题,这些问题的存在并不影响到产品的正常使用,可以算做是故障,也可以不算做故障,因此,故障需要有明确的故障判据,同一发动机不同使用部门所确定的故障判据可能不一致,但在同一使用部门,则应有统一的要求,判据不同,故障统计数据也不同,直接影响到故障统计分析。

1.1.4 故障分类

故障可以从多种角度来认识和加以分类,《GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语》“2.2 故障与失效”中,对故障分类的定义有:

2.2.3 单点故障 single point failure

会引起系统故障,而且没有冗余或替代的操作程序作为补救的产品故障。

2.2.4 灾难故障 catastrophic failure

导致人员伤亡、系统毁坏、重大财产损失的故障。亦称灾难性故障。

2.2.5 严重故障 critical failure

导致产品不能完成规定任务的故障。原称致命性故障。

2.2.6 系统性故障 systematic failure

由某一固有因素引起,以特定形式出现的故障。它只能通过修改设计、制造工艺、操作程序或其他关联因素来消除。

2.2.7 偶然故障 random failure

由偶然因素引起的故障。

2.2.8 渐变故障 gradual failure

产品性能随时间的推移逐渐变化而产生的故障。这种故障一般可通过事前的检测或监控来预测,有时可通过预防性维修加以避免。

2.2.9 间歇故障 intermittent failure

产品发生故障后,不经修理而在有限时间内或适当条件下自行恢复功能的故障。

2.2.10 共因故障 common cause failure

不同产品由共同的原因引起的故障。

2.2.11 隐蔽功能故障 hidden function failure

正常使用装备的人员不能发现的功能故障。其功能的中断不易被正常使用装备的人员发现,或一般情况下不工作的产品在需要使用时是否良好,不易被正常使用装备的人员发现。

2.2.12 潜在故障 potential failure

产品或其组成部分即将不能完成规定功能的可鉴别的状态。

2.2.13 多重故障 multiple failures

由两个或两个以上的独立故障所组成的故障组合,它可能造成其中任一故障不能单独引起的后果。

2.2.14 重复故障 pattern failures

同一种产品在同样的或等效的使用方式中出现两次或两次以上的故障,且引起这些故障的基本机理相同。

2.2.15 从属故障 dependent failure

由另一产品故障引起的故障,亦称诱发故障。

2.2.16 独立故障 independent failure

不是由另一产品故障引起的故障。亦称原发故障。

2.2.17 非关联故障 non-relevant failure

已经证实是未按规定的条件使用而引起的故障;或已经证实仅属某项将不采用的设计所引起的故障。否则为关联故障。

2.2.18 非责任故障 non-chargeable failure

非关联故障或事先已经规定不属某个特定组织提供的产品的关联故障。否则为责任故障。

2.2.19 早期故障 infant mortality/early life failure

产品在寿命的早期因设计、制造、装配的缺陷等原因发生的故障,其故障率随着寿命单位数的增加而降低。

2.2.20 耗损故障 wear out failure

因疲劳、磨损、老化等原因引起的故障,其故障率随着寿命单位数的增加而增加。

故障也可以从维修的角度来分类:

按故障的发展过程,可分为功能故障与潜在故障。功能故障是指产品不能完成规定功能的事件或状态,简称为故障;潜在故障是指产品将不能完成规定功能的可鉴别状态。

按故障的可见性,可分为明显功能故障与隐蔽功能故障。明显功能故障,是指正常使用发动机的人员能够发现的功能故障,这类功能故障一般由操作人员凭感觉器官或是在用到某功能时发现的。隐蔽功能故障是指正常使用发动机的人员不能发现的故障,它必须在发动机停机后做检查或测试时才能发现。

按故障的相互关系可分为单个故障与多重故障。单个故障有两种情况:一是独立故障而不是由另一产品故障引起的原发性故障;二是从属故障,是由另一产品故障引起的继发性故障。多重故障,是指由连续发生的两个或多个独立故障所组成的故障事件,其后果可能比其中任何一个故障所造成的后果更严重。多重故障与隐蔽功能故障有着密切的关系。如果隐蔽功能故障没有及时发现和排除,它与另一个独立故障结合,就会造成多重故障,可能产生严重后果。

故障也可以从下面的不同角度进行分类。

1. 按故障发生、发展的快慢分类

按故障发生、发展的快慢分为突发性故障和渐进性故障。

(1) 突发性故障。这种故障的发生具有偶然性,与使用时间的长短无关,不可预测,发生前没有任何可察觉的征兆,发生后状态急剧恶化,必须立即排除。

(2) 渐进性故障。大部分发动机故障都是渐进性故障,这种故障是由于发动机的技术指标逐渐劣化(磨损、腐蚀、疲劳、老化等因素的影响),最终超出允许限度而引起的。发生这种故障的概率与使用时间的长短有关,可以预测,设备使用的时间越长,发生的概率越高。这种故障一旦发生就标志发动机寿命的结束,需要进行大修。

2. 按故障的表现分类

按故障的表现分为功能故障和潜在故障。

(1) 功能故障(实际故障)。发动机丧失了或明显降低了工作能力,叫功能故障。这类故障容易发现,操作者能直接感受出来。

(2) 潜在故障。与渐进性故障相联系。虽然故障在功能方面尚未表现出来,但已发展到能鉴别出来的程度时,就认为是一种故障现象,并称为潜在故障。例如疲劳裂纹、密封件老化、零件磨损等现象出现时,就认为存在潜在故障。及时处理潜在故障,防止发展成为功能故障,在发动机使用过程中有着非常重要的意义。

3. 按故障发生的原因分类

按故障发生的原因分为人为故障和自然故障。

(1) 人为故障。发动机在制造或大修时,使用了不合格的零件,运行时不遵守操作规程,以及运输、保管不当等原因,都会使发动机出现故障,这种故障称为人为故障。

(2) 自然故障。发动机在使用和保存期间,由于受到外部和内部各种自然因素的影响而引起的故障,都叫自然故障,如正常情况下的磨损、老化、腐蚀等引起的故障都属这个范畴。

1.1.5 故障模式

《GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语》“2.2 故障与失效”中,对故障模式的定义是:

2.2.21 故障模式 failure mode

故障的表现形式。如短路、开路、断裂、过度耗损等。

故障模式往往是可以观测到的。

对于航空发动机产品来说,结构方面最常见的失效方式就是变形失效、断裂失效和磨损失效。

1. 变形失效

变形失效常见的形式是弹性变形失效和塑性变形失效。机械构件受到外力的作用总是要产生变形的,若其变形量在设计许可的范围内,则其变形属于正常状态。如果构件在实际工作中发生了超过设计许可范围的弹性变形或塑性变形,在这种情况下,构件就出现了过量变形失效。

零件的弹性变形失效是由过大的弹性变形引起的,此时零件所受的应力已超过弹性极限,应力与应变之间的关系已不能由胡克定律来描述;当零件过载时,塑性材料还会发

生塑性变形,这会造成零件的尺寸和形状改变,破坏零件与零件间的相互位置和配合关系,使零件或机器不能正常工作,如花键扭曲、螺栓受载后被拉长(塑性变形)等。

2. 断裂失效

断裂失效是对航空装备安全性危害非常大的一种失效形式,因此,需要对断裂失效进行大量的分析研究。迄今为止,断裂失效的分析与预防已发展为一门独立的边缘学科。

断裂失效的具体形态是多种多样的,它可以按不同方法进行分类。例如,按断裂前所产生的宏观塑性变形量的大小,分为塑性断裂(断裂前发生较明显的塑性变形)、脆性断裂(断裂前几乎不产生明显的塑性变形)和塑性—脆性混合型断裂(又称为准脆性断裂,变形在5%~10%范围内出现的断裂);按断裂路径的走向,分为穿晶断裂(裂纹穿过晶粒内部)和沿晶断裂(断裂沿着晶粒边界扩展);按断裂机制,分为解理断裂、准解理断裂、韧窝断裂、滑移分离断裂及疲劳断裂等。

航空装备或产品在运行过程中常常发生断裂失效现象,从而造成不同程度的损失,尤其是脆性断裂失效,因此,人们对断裂失效现象比较重视。长期以来,在断裂失效方面做了大量的工作,国内外均有专著及论文报道。

在航空发动机的断裂案例中,疲劳断裂失效居首位,它占失效实例总数的60%~70%左右;塑性断裂对航空发动机造成的危害远较脆性断裂小,因为它在断裂之前出现明显的塑性变形,易引起人们的注意。与此相反,脆性断裂往往引起危险的突发事故。

3. 磨损失效

磨损是机械零部件的三种主要破坏形式(磨损、腐蚀和断裂)之一。航空发动机运转时,任何机件在接触状态下相对运动(滑动、滚动),都会产生摩擦,而磨损是摩擦的结果。如果零件表面受到了损伤,轻者使受损零件部分失去了其应有功能,重者会完全丧失其使用性。如齿轮表面、轴承表面、控制活门表面等。可见,磨损失效是导致航空发动机效率、准确度下降甚至使其报废的一个重要原因。

磨损过程具有动态特征,机件表面的磨损不是简单的力学过程,而是物理、力学和化学过程极为复杂的综合。一般地,磨损可分为粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、微动磨损等。

需要注意的是,航空发动机产品既包括金属构件,也包括非金属构件,理所当然地,对产品失效的研究也应包括非金属构件在内。航空发动机非金属件的数量和种类很多,制件体积比较小,重量也轻,材料的性质各异。例如,有的材料在常温下属于脆性材料(如滑油箱观察窗玻璃),有的是高弹性材料(如橡胶),有的强度特别高(如机匣复合材料),并且许多都是关键的部件。有许多实例也证明,非金属件的失效完全可能导致不同程度的事故,因此必须予以高度重视。

目前,我国航空非金属件所使用的材料和工艺,大多是20世纪60年代—70年代延续下来的。总的来说,材料工艺相对比较稳定,制作的产品经多年使用仍有较高的可靠性。但是,许多制件在设计或其他方面仍存在不足,一般情况下,要经常检查航空发动机使用的非金属件,凡不符合要求的或到寿命期的都要更换。

1.1.6 故障诊断

中华人民共和国国家军用标准《GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语》