基于危害度航空发动机可靠性评估模型及应用

王大伟 马艳红 洪 杰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对航空发动机可靠性指标评估的需要, 提出了基于危害度故障统计分析模型. 该模型考虑各故障样本对发动机危害性的影响, 将出现的故障按照对发动机安全、性能、任务及维修等指标的影响进行等级分类, 从故障的失效机理出发建立相应的分布模型, 采用分布计算和二次分布等算法进行整体可靠性指标评估. 应用该模型对英产和国产的2种同类型航空发动机进行了故障统计分析, 计算了2种发动机的可靠性指标, 并进行了对比分析. 最后以累积工作时间和日历工作时间进行了故障的时间变化分析, 提出了故障样本的时效性.

关 键 词: 可靠性评估; 危害度; 时效性

中图分类号: TB 114

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)08-0883-04

Reliability assessment model and application for aero-engine based on criticality method

Wang Dawei Ma Yanhong Hong Jie

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The reliability assessment model based on criticality method was proposed for aero-engine reliability evaluation. Various aero-engine fault samples which affected the normal work were considered in this model. The entire appearance fault sample was classified by the targets of aero-engine safety, performance, tasks and maintenance. A corresponding distribution statistical model was founded on the failure mechanism of fault samples, and the reliability targets were statistically analyzed by using distribution method and two-distribution method. English aero-engines and Chinese ones which are with same types were statistically analyzed by this model. Time Tracking analysis method of fault samples based on cumulation working hours and calendar time was discussed, and the time effectiveness of fault samples was considered.

Key words: reliability assessment; criticality; time effectiveness

对航空发动机可靠性评估是衡量发动机可靠性是否达到预期设计目标和促进可靠性增长的重要途径. 因此对发动机可靠性评估方法的研究是相当必要和关键的. 然而, 目前航空发动机的可靠性评估方法还不完善, 因此, 需要进行科学合理的可靠性评估方法研究.

MTBF(Mean Time Between Failure)是可靠性评估中最常用指标之一, 传统的评估方法只计故障数量, 不考虑故障的危害性, 难以体现可靠性指标对产品的安全性和任务成功率与战备完好率的影响. 本文针对航空发动机在外场使用过程中出现的大量故障数据, 提出一种基于危害度的故障统计方法, 并应用于航空发动机的可靠性评估.

1 基于危害度的故障统计模型

数学平均值法不计算母体的分布, 直接用子样统计量去估计母体的特征值, 因此也称为非参数法. 用平均值法计算发动机的MTBF是一种经典的点估计方法, 算法简单, 但结果比较粗糙, 而且结果对故障数目的变化比较敏感. 平均值法把

收稿日期: 2007-07-09

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0171)

作者简介: 王大伟(1975-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士生, wangdawe@sjp.buaa.edu.cn.

发动机的所有故障同等看待, 因而无法计入故障对发动机危害性的影响.

由故障样本数据进行可靠性评估, 传统的分布计算法是将所有故障样本进行混合, 分布检验, 确定分布模型, 计算可靠性指标. 这种方法虽然可以拟合检验出符合的分布类型, 在数学上合理, 但从工程上看, 故障样本它们属于不同的失效模式, 而失效模式决定了故障的分布类型, 相同的故障模式是属于同一分布类型的, 因此, 由失效模式去建立分布模型是科学合理的. 总体分布模型实际上是多种分布模型的综合.

基于危害度的故障统计模型以故障对发动机危害性的影响进行分级, 从各自故障的失效机理出发建立相应的分布统计模型, 再采用分布计算法和二次分布等算法进行可靠性指标计算. 具体分析流程见图 1.

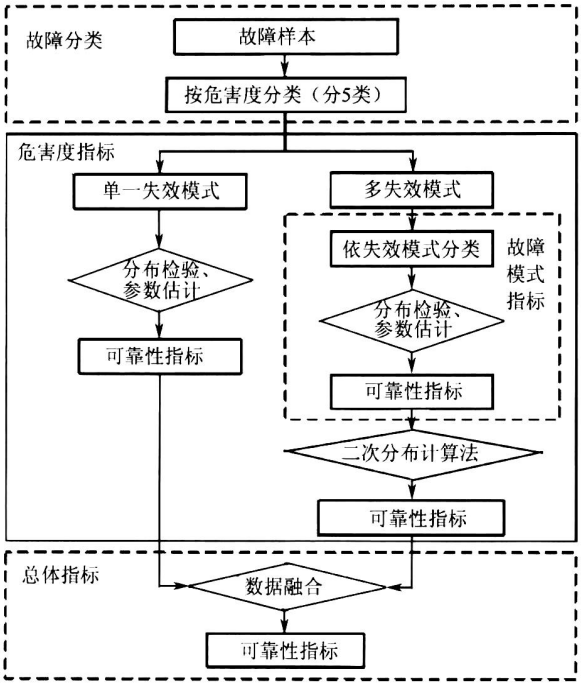


图 1 基于危害度故障统计流程

1) 按故障危害度进行等级分类;

2) 对每一类故障进行分布检验, 对于单一失效模式的故障直接进行拟合检验和参数估计得到可靠性指标;

3) 对于在一类故障中同时存在多种失效模式的, 对各类失效模式分别进行分布检验和参数估计, 然后利用二次分布方法对该类故障的各种模式的指标进行分布检验和参数估计, 得到该类故障的可靠性指标;

4) 对各类故障的分布参数利用二次分布法进行分布检验和参数估计, 得到整体可靠性参数的分布, 从而确定整体可靠性指标.

1.1 基于危害度的故障分类

由于零件失效所引起的产品或系统失效, 并不一定都使产品达到“致命”程度. 因此明确失效后的严重程度及其概率是定量分析中的重要环节[1-2]. 对航空发动机而言, 其结构更复杂、故障模式更多[3], 不同的故障对发动机的危害性差异显著. 因此, 按照危害度对航空发动机的故障进行等级分类, 会使发动机可靠性评估的结果更加合理. 本文针对航空发动机在外场出现的大量故障, 并结合国军标[4-5]的要求, 提出按危害度等级分为 5类, 具体分类标准如下:

Ⅰ类故障为断裂性故障, 是发动机关键件的断裂故障, 其破坏后未被包容而可能引起飞机失事;

Ⅱ类故障为任务性故障, 是导致不能继续飞行或不能完成预定任务的那些构件破坏的故障;

Ⅲ类故障为耐久性故障, 其破坏导致显著的维修负担, 但不至危及飞行安全或影响任务的完成;

Ⅳ类故障为消耗性故障, 是危害性较轻的消耗件故障, 修复后不影响发动机性能;

Ⅴ类故障为轻微性故障, 是很容易排除的或受人为因素影响的故障.

1.2 各危害度故障可靠性指标评估

若某一类故障只包含单一故障模式, 则直接对该故障模式进行分布检验、参数估计, 确定该类故障的可靠性指标.

若某一类故障包含有多种故障模式, 则需把此类故障按照故障模式分类. 故障机理决定了分布的类型, 对每一类故障模式进行分布检验、参数估计, 确定每类故障模式的可靠性指标; 采用二次分布法, 将各故障模式的指标二次混合, 进行分布检验和参数估计, 确定此类故障的可靠性指标.

航空发动机的故障模式多种多样, 用何种分布来描述某一具体的故障模式需要通过典型分布的检验来确定, 如 W 检验 (正态检验)、605-χ^2 检验 (指数检验)、M 检验 (威布尔检验)等等.

分布计算法是首先将发动机的故障数据进行分析求出故障的分布规律, 如指数分布、正态分布、威布尔分布等, 然后根据分布规律计算出可靠性指标. 二次分布算法是在分布计算法原理的基础上, 将故障按照失效模式分类, 分别计算同一故障模式的分布规律和可靠性指标, 然后再将故障模式的指标进行二次混合, 计算出总体的分布规律和可靠性指标.

1.3　总体可靠性指标评估

各危害度故障可靠性指标确定以后,再用二次分布算法,将各危害度可靠性指标进行二次混合,得到关于各危害度可靠性指标的混合数据,然后进行拟合检验和参数估计,进而建立总体可靠性指标的分布模型,再根据总体模型进行总体可靠性指标的评估.

2　两种发动机可靠性指标评估

利用航空发动机故障数据进行 MTBF 评估,采用数学平均值法是用发动机总累积工作时间除以总故障数;整体混合分布计算方法是将所有故障进行一次混合,用数学方法进行拟合检验,确定分布模型,然后进行 MTBF指标评估.

由于点估计值也是一个随机变量,它与母体可靠性参数的真值可能很接近,也可能相差很大,由于点估计不能反映估计的可信程度,所以对母体的可靠性特征参数常常给出一个区间估计[6].对于航空发动机的 MTBF 值,关心的是置信下限[7].在给定置信度条件下,威布尔分布寿命的置信下限的系数受形状参数、特征参数和样本数目的影响[8].

针对使用状况相近的两种航空发动机,对其在外场使用情况进行可靠性指标计算分析.其中英产发动机是在设计、生产和使用中具有上万小时累积,即为成熟的航空发动机;国产发动机是使用时间较少的新研制的新机.分别抽取两种发动机各 20台,是在 4 a使用中的故障数据.

表 1列出了应用危害度故障统计模型计算的两种发动机各危害度故障的 MTBF点估计值和区间估计下限(置信度为 90%).发动机故障样本数量越多,置信区间越短,故障样本数量越少,置信区间越大.

应用数学平均值法、整体混合一次分布法和基于危害度故障统计方法对发动机总体可靠性指标进行评估,其结果列于表 2中.

表 **1**　两种发动机的各类 MTBF评估

危害度等级	英产发动机			国产发动机		
	分布类型	MTBF点估计 /h	区间估计下限 /h	分布类型	MTBF点估计 /h	区间估计下限 /h
MTBFⅠ	威布尔	499.4	395.5	威布尔	255.0	201.5
MTBFⅡ	正态	237.8	199.4	正态	138.7	114.0
MTBFⅢ	威布尔	173.2	142.0	威布尔	149.0	121.3
MTBFⅣ	威布尔	142.2	131.8	威布尔	101.4	93.3
MTBFⅤ	威布尔	207.0	175.0	正态	122.3	103.9

表 **2**　发动机总 MTBF评估

方　法	英产发动机			国产发动机		
	分布类型	总体 MTBF /h	区间估计下限 /h	分布类型	总体 MTBF /h	区间估计下限 /h
数学平均值法		124.3			106.8	
整体一次分布法	威布尔	130.5	121.5	威布尔	112.2	104.6
危害度法	威布尔	240.8	192.2	威布尔	157.0	135.3

由结果可看出,应用数学平均值法和整体混合一次分布法结果比较接近,是因为这 2种方法采用的故障样本是相同的,而计算方法不同,一个是平均值,一个是分布的数学期望.基于危害度的故障统计是从故障模式指标出发,到各危害度可靠性指标,再到总体可靠性指标.采用二次分布实现从部分到整体的指标融合.对于故障模式的融合,由于它们的样本数量和故障时间基本相当,所以采用二次分布融合比较合理.而对于各危害度指标的融合,由于它们的样本数量和危害度有较大差异,直接采用二次分布融合,实际上夸大了Ⅰ类故障在数据融合中的作用,使得计算结果偏大.

表 3列出了英产和国产发动机典型故障模式评估结果,从对比中可以看出,国产发动机与英产发动机存在着一定的差距.

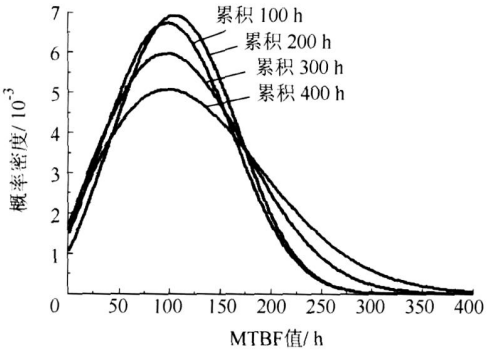
表 **3**　两种发动机典型故障对比

发动机	故障模式	故障数目	故障率	分布类型	平均寿命 /h
英产	温控放大器故障	26	1.034	威布尔	211.2
	漏油	25	0.969	指数	215.8
	热电偶故障	22	0.775	威布尔	301.5
	喷口裂纹	18	0.517	正态	305.3
	高停开关故障	25	0.969	威布尔	332.9
	催化点火器故障	21	0.711	威布尔	225.4
国产	温控放大器故障	22	1.667	威布尔	90.5
	漏油	20	1.486	威布尔	110.2
	热电偶故障	19	1.446	威布尔	157.2
	喷口裂纹	16	0.782	正态	136.7
	轴承故障	20	1.607	威布尔	207.8
	防喘调节器故障	18	1.286	威布尔	157.1

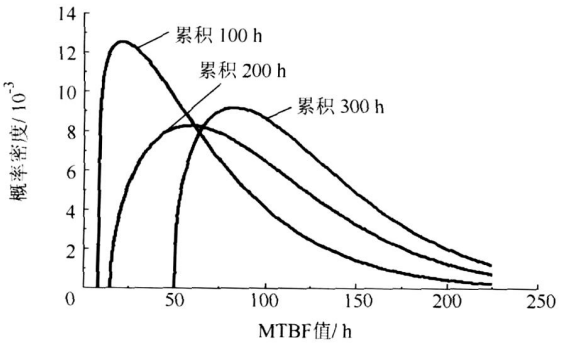
3 可靠性指标随使用时间的变化

以发动机累积使用时间进行分段统计, 步长取为 100 h, 考察发动机在各阶段的可靠性指标变化情况.

由图 2可以看出, 英产发动机在不同阶段MTBF的分布曲线相差不大, 分布参数相近, 反映了发动机性能的稳定性; 而国产发动机在不同阶段一致性较差, 随着使用时间的增长, 曲线的总体水平在逐渐向后移动, 这意味着国产发动机在使用前期故障率较高, 总体 MTBF值较低, 随累积使用时间的增加, 发动机可靠性指标逐步提高, 性能越来越稳定.



a 英产发动机



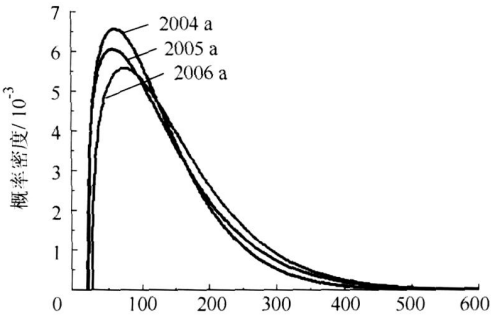
b 国产发动机

图 2 可靠性指标随累积使用时间的变化

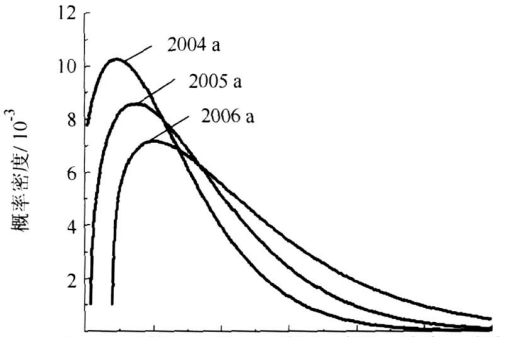
4 可靠性指标随日历时间的变化

以发动机日历工作时间进行分段统计, 步长取为 1 a, 考察发动机在各阶段的可靠性指标变化情况.

从图 3可以看出, 英产发动机在不同的日历时间段内 MTBF变化不大, 说明英产发动机的性能是稳定的. 而国产发动机在不同的日历时间段内 MTBF的分布是不一样的, 原因主要是由于国产发动机刚投入使用, 故障不是一成不变的, 随着日历时间的增加, 发动机的不断改进和完善, 某些故障的发生也逐渐被减弱和排除. 故障在样本中的作用效力发生了改变, 使得发动机的 MTBF曲线发生了改变.



a 英产发动机



b 国产发动机

图 3 可靠性指标随日历时间的变化

5 结束语

利用基于危害度的可靠性评估模型对外场使用的航空发动机可靠性指标进行评估, 可考虑不同危害度等级的故障对整机可靠性的影响. 通过对各危害度的指标统计分析, 可以找到影响整机可靠性指标主要问题的根源, 明确了提高整机可靠性的主要方向. 用二次分布法对各个危害度指标进行融合同等对待了各危害度样本在评估中的作用, 因此, 为了使数据融合更加合理, 可采用Bayes数据融合方法, 充分考虑故障样本在融合中的作用, 使发动机的可靠性指标评估更加科学.

运用该模型对英产和国产的同一型号发动机进行可靠性指标计算和对比分析可以看出, 英产发动机技术成熟, 发动机性能稳定, 随着时间的增长发动机的可靠性指标没有明显变化, 因此可用整体故障样本对其进行可靠性评估; 而国产发动机处于刚投入使用阶段, 前期故障率高, 随着使用时间的增长, 在不同阶段发动机的可靠性指标有一个由低到高的增长过程, 故障在样本中有时间效应, 因此, 要反映发动机当前的可靠性水平, 在进行可靠性评估时就要考虑故障样本的时效性.

(下转第 899页)

因此, 复相关值相位误差产生的主要原因是群延迟不一致与本振相位不一致; 幅度误差产生的主要原因是中心频率不一致、带宽不一致、群延迟不一致与带内波动不一致.

4 结　论

本文分析了接收机频率响应的非理想性对综合孔径微波辐射成像复相关值干涉测量的影响, 这些不理想性包括: ①中心频率不一致; ②带宽不一致; ③群延迟不一致; ④本振相位不一致; ⑤带内波动. 接收机频率响应的非理想性是通过条纹洗涤函数对复相关值测量值产生误差, 结果表明群延迟不一致与本振相位不一致是产生相位误差的主要原因, BHU-2D 系统校正之前的相位误差大于 2π rad; 中心频率不一致、带宽不一致、群延迟不一致及带内波动均产生幅度误差, BHU-2D 系统校正之前的总幅度误差不大于 3.7%.

条纹洗涤函数的原点值相位误差及幅度误差可通过噪声注入法校正, 相对于原点值的条纹洗涤函数作为残留误差保留下来. 对于 BHU-2D 系统, 校正条纹洗涤函数的原点值后, 幅度残余误差小于 0.49%, 相位残余误差小于 0.01°, 因此残余误差的影响可忽略.

参考文献 (References)

[1] Camps A, Corbella I, Vall-llossera M, et al. The SMOS end-to-end performance simulator: description and scientific applications [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Toulouse: IEEE, 2003, 1: 13-15

[2] Lambrigtsen B, Wilson W, Tanner A, et al. GeoSTAR-a microwave sounder for geostationary satellites[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Anchorage: IEEE, 2004, 2: 777-780

[3] 董晓龙, 吴季, 姜景山. 信道互耦和不平衡度对综合孔径微波辐射计复相关干涉测量的影响分析及其校准[J]. 电子学报, 2001, 29(7): 1280-1282
Dong Xiaolong, Wu Ji, Jiang Jingshan. Analysis and calibration of effects on complex correlations from mutual coupling and imbalance between channels[J]. Acta Electronica Sinica, 2001 (7): 1280-1282 (in Chinese)

[4] Vedrilla S R. Calibration, validation and polarimetry in 2D aperture synthesis application to MIRAS[D]. Barcelona: European Space and Technology Center, 2005

[5] Corbella I, Duffo N, Vall-llossera M, et al. The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry[J]. IEEE Trans on Geosci and Remote Sens, 2004, 42(8): 1677-1682

(责任编辑: 娄　嘉)

(上接第 886页)

参考文献 (References)

[1] HB/Z281-95, 航空发动机故障模式、影响及危害性分析指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996: 21-25
HB/Z281-95, Guide for fault mode, effect and severity analysis of aero-engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996: 21-25 (in Chinese)

[2] 孔瑞莲. 航空发动机可靠性工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995: 145-146
Kong Ruilian. Reliability engineering for aeroengine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1995: 145-146 (in Chinese)

[3] 宋兆泓. 航空发动机典型故障分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993: 32-42
Song Zhaohong. Representative failure analysis for aeroengine[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1993: 32-42 (in Chinese)

[4] MIL-HDBK-1783B, 发动机结构完整性大纲[S]
MIL-HDBK-1783B, Structure integrality précis of aero-engine[S] (in Chinese)

[5] GJB 241-87, 航空涡喷、涡扇发动机通用规范[S]
GJB 241-87, General criterion of jet turbine engine and fan jet engine[S] (in Chinese)

[6] Winterbottom A. The interval estimation of system reliability from component test data[J]. Operations Research, 1984, 32(3): 628-640

[7] Romeu J L. Confidence bounds for system reliability[R]. AD-A160857, 1985: 131-133

[8] Martz H F, Duran B S. A comparison of three methods for calculating lower confidence limits on system reliability using binomial component data[J]. IEEE Trans Reliability, 1985, 34(2): 113-120

(责任编辑: 张　嵘)