

文章编号:1000-8055(2013)05-0983-06

基于模糊积分的航空发动机 MTBF 动态评估方法

王大伟¹, 王 伟^{1,2}, 冯振宇¹

(1. 中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300;

2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 针对传统评估方法无法解决航空发动机可靠性评估的滞后问题, 采用模糊积分方法建立航空发动机动态可靠性评估模型. 引入故障强度因子, 建立降半正态型分布的故障强度因子函数表示故障纠正过程. 通过故障强度因子得到模糊密度, 采用 Choquet 模糊积分方法融合发动机各阶段可靠性指标, 解决了航空发动机可靠性指标的动态评估问题. 对在研的某小型涡扇发动机进行了应用研究, 结果表明采用 Choquet 模糊积分数据融合方法进行动态评估能考虑到不同阶段故障数据的重要性, 对发动机当前的可靠性水平能给予更加科学的评价.

关 键 词: 航空发动机; 可靠性指标; 故障强度; 模糊积分; 动态评估

中图分类号: V21; TB114

文献标志码: A

Dynamic assessment model for MTBF of aero-engine based on fuzzy integral

WANG Da-wei¹, WANG Wei^{1,2}, FENG Zhen-yu¹

(1. Tianjin Key Laboratory for Airworthiness and Maintenance of Civil Aircraft,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. College of Aeronautical Engineering,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The lag problem of reliability assessment of the aero-engine was studied aiming at the limitation existed in the traditional assessment methods. The dynamic aero-engine reliability assessment model was established by using fuzzy integral method. Reasonably fault samples of every stage for data fusion were used, which were key issues of dynamic assessment for aero-engine reliability. The failure intensity factor was introduced. The failure rectification process was expressed by the low half normal distribution function of failure intensity factor. Fuzzy density was obtained by the failure intensity factor. The reliability targets of aero-engine were fused using Choquet fuzzy integral method. Dynamic assessment for reliability targets of aero-engine was realized. The research results were applied to the small turbofan engine. Using Choquet fuzzy integral data fusion method for dynamic assessment can take the importance of each stage fault samples in consideration. The method provides scientific evaluation for the aero-engine reliability.

收稿日期: 2012-05-22

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130508.0949.201305.983_004.html

基金项目: 中央高校基本科研业务费(ZXH2011C004); 中国民航大学科研启动基金(2010QD08X)

作者简介: 王大伟(1975—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机适航审定技术研究.

Key words: aero-engine; reliability targets; failure intensity; fuzzy integral; dynamic assessment

航空发动机结构复杂,为了达到较高的可靠性水平,从设计到定型需要经过反复的试验—改进—再试验—再改进的过程.随着设计、材料和工艺的不断改进,其系统属于动态母体^[1].系统母体的动态变化给可靠性指标评估带来了一定的难度.

航空发动机在研制过程中的不同阶段都会积累一些故障数据,这些数据是进行可靠性评估的基础.发动机可靠性指标评定需综合利用各阶段信息,而不同阶段的故障数据对发动机当前可靠性指标的贡献是不一样的.因此,如何合理利用各阶段信息进行数据融合,是发动机可靠性指标动态评估的关键问题.

航空发动机 MTBF(mean time between failure)是衡量发动机可靠性水平的一个重要参数.传统评定方法采用数学平均值,即在规定的条件下和规定的时间内,发动机总工作时间与总故障次数之比.这种方法是对 MTBF 的一种近似估计,将不同阶段的故障数据同等对待,不考虑故障数据的时效性,结果无法体现发动机各阶段故障数据对 MTBF 的动态影响^[2-3].对此,本文建立基于模糊积分数据融合的航空发动机 MTBF 动态评估模型.

本文采用 Choquet 模糊积分方法融合发动机各阶段可靠性指标,综合考虑各阶段数据对发动机可靠性指标进行动态评估.将发动机不同阶段的可靠性指标输出作为可测函数,引入故障强度因子得到模糊密度,进一步得到模糊测度,根据 Choquet 模糊积分融合原理得到可测函数基础上模糊测度的模糊积分值.

1 MTBF 指标评定

为克服取数学平均值评估方法精度差的缺点,采用分布计算法评定 MTBF 指标.根据故障数据求出发动机 MTBF 的分布规律,根据分布规律进行指标评定.

1.1 分布拟合检验

1.1.1 指数分布

指数分布的主要特点是失效率为常数,且故障发生具有无记忆性^[4].航空发动机有些故障具有无记忆性质,在发生前一个故障和发生下一个故障之间没有任何联系,即发生的是无后效事件,

在进行发动机可靠性评估中,对于具有这样性质的故障,可以用指数分布来描述.当故障性质不好确定时可结合数学检验方法来检验确定指数分布.检验方法可采用工程上常用的 $605-\chi^2$ 检验和 Gnedenko 检验^[5].

1.1.2 正态分布

正态分布是可靠性工程中最常见的概率分布,用正态分布可描述发动机性能方面的故障.检验方法可采用夏皮罗-威尔克的 W 检验和达戈斯蒂诺的 D 检验.

1.1.3 威布尔分布

零件的寿命或疲劳强度总有一个极限值,例如材料有一个疲劳极限值,低于这些极限值材料的失效概率可以看作为 0.因此从物理模型出发描述寿命的分布,不应该是正态的而应是偏态的,威布尔分布正适应了这一情况^[6].对于航空发动机系统,凡是由于某一局部疲劳失效或故障便引起系统机能失效的构件、设备或组件的寿命,都是服从威布尔分布的.工程上有很多常见的检验方法,如 Mann, Scheuer & Fertig 检验^[7].

1.2 分布参数估计

确定数据的分布类型后,可靠性评估的主要任务就是根据样本来估计总体的分布参数.参数估计的方法很多,如矩估计、极大似然估计、图估计等.这些方法是针对寿命分布的不同特点而研究出来的,在分布未知时可采用矩估计;极大似然估计适用于指数分布、正态分布、威布尔分布的参数估计;图估计多应用于现场.

1.3 指标评定

经过分布拟合检验确定分布类型,参数估计确定分布参数后,需要进行 MTBF 指标评定.取分布的数学期望值作为 MTBF 的估计值.例如零件工作寿命服从威布尔分布,则数学期望值 θ 为

$$\theta = E(t) = t_0 + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (1)$$

其中 t_0, m, η 分别为威布尔分布的位置参数、形状参数和特征参数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Γ 函数.

2 故障强度因子

发动机的故障样本反映出发动机当时的可靠性状态,但随着发动机设计改进和工艺水平的提

高,发动机系统是动态变化的,故障样本反映发动机的可靠性水平逐渐表现出“滞后”现象.航空发动机属于大型复杂的可修复系统,故障率随着故障的纠正而不断变化,为了反映当前发动机此类故障模式的瞬时故障率,引入故障强度因子 k ,表示此类故障当前的故障强度.

航空发动机在研制过程中,某一故障模式的故障强度是变化的.故障发生阶段,故障强度因子最大,随着采取纠正措施,故障被排除,故障强度因子迅速下降,当故障排除后,故障强度因子降到最小.但从概率意义上说,不能将故障发生概率降为0,即故障强度因子可以趋于0但不等于0.对此,建立降半正态型分布表示故障强度因子的变化过程,建立的故障强度因子函数表达式为

$$k(t) = \begin{cases} 0 & t \leq a \\ \exp\left[-\left(\frac{t-a}{b}\right)^2\right] & t > a, b > 0 \end{cases} \quad (2)$$

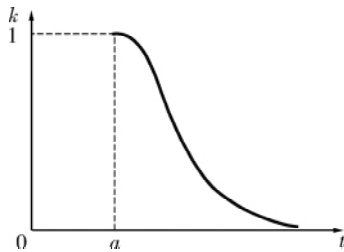


图1 故障强度因子

Fig.1 Failure intensity factor

参数 a 表示故障发生的阶段,当 $t=a$ 时故障强度因子 k 最大,即 $k=1$.随时间的推移,故障强度因子 k 成正态规律下降.

参数 b 表示故障强度因子 k 下降的速率,当 $b=1$ 时,故障强度因子 k 为标准正态型;当 $b>1$ 时,故障强度因子 k 下降的速率慢,其值越大表示故障纠正越困难;当 $b<1$ 时,故障强度因子 k 下降速率快,其值越小表示故障纠正越容易.

通过引入故障强度因子,将故障样本与发动机系统可靠性的动态变化建立了联系.故障强度因子反映出当前发动机发生此类故障的概率,随着故障强度因子的不断减小,说明此类故障模式发生的概率不断减小,发动机系统的可靠性水平不断提高.

3 模糊积分数据融合

模糊积分是定义在模糊测度基础上的一种非线性函数,它具有融合多源信息的能力.模糊积分

数据融合需要确定模糊密度和可测函数.模糊密度反映了信息源在数据融合过程中的重要性,在可靠性指标的时间域融合中,通过故障强度因子得到模糊密度及模糊测度.将发动机不同阶段的可靠性指标输出作为可测函数 $h(\cdot)$,这样不同的时刻就可以得到不同的可测函数.利用模糊积分数据融合可以把不同时刻的指标结果综合起来.

模糊积分有两种形式,一种是 Sugeno 模糊积分^[8],特点是直接排除了次要因素的影响,强化了主要因素的作用,但却完全忽视次要因素的影响,因此 Sugeno 模糊积分属于“主因素突出型”.另一种是 Choquet 模糊积分^[9-10],Choquet 积分是 Lebesgue 积分的严格推广,当模糊测度可加时,即模糊测度是传统测度时,Choquet 模糊积分能够还原成 Lebesgue 积分.Choquet 模糊积分的特点是考虑了各种影响因素,避免了 Sugeno 模糊积分的缺陷.因此 Choquet 模糊积分在信息融合中近来得到了重视和广泛应用^[11-15].

3.1 Choquet 模糊积分

定义1 模糊测度

设 g 是从 X 的幂集 $P(X)$ 到 $[0,1]$ 的映射,如果 g 满足

有界性: $g(\Phi)=0, g(X)=1$.

单调性:对 $\forall A, B \in P(X)$,若 $A \subseteq B$,则 $g(A) \leq g(B)$.

连续性: $\forall A_i \in P(X)$,且 $\{A_i\}_{i=1}^{\infty}$ 单调,即存在 $A_1 \subseteq A_2 \subseteq \dots \subseteq A_n \subseteq \dots$ 或者 $A_1 \supseteq A_2 \supseteq \dots \supseteq A_n \supseteq \dots$,则

$$\lim_{i \rightarrow \infty} g(A_i) = g(\lim_{i \rightarrow \infty} A_i) \quad (3)$$

称 g 是 $P(X)$ 上的模糊测度.

定义2 g_λ 测度

设 g_λ 是从 X 的幂集 $P(X)$ 到 $[0,1]$ 的映射,且满足 $g_\lambda(X)=1$;对 $\forall A, B \in P(X)$,若 $A \cap B = \Phi$ 有

$$g_\lambda(A \cap B) = g_\lambda(A) + g_\lambda(B) + \lambda g_\lambda(A) g_\lambda(B) \quad (4)$$

则称为 g_λ 测度.

定义3 模糊积分

设 g 为模糊测度, (X, Ω) 是模糊可测空间, $h: X \rightarrow [0,1]$ 是一个可测函数,则在 $A \subset X$ 范围内的函数 $h(x)$ 相对于模糊测度 g 的模糊积分为

$$\int_E h(x) \circ g(\cdot) = \sup_{E \subset X} \{ \min [\min_{X \in E} h(x), g(A \cap E)] \} \quad (5)$$

式中 $og(\cdot)$ 表示 $g(\cdot)$ 的模糊微分.

为了计算模糊积分的方便,假设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是一个有限集合,且假定 $h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n)$ (如果此条件不满足可以调整集合 X 中元素的顺序使之满足该条件),则 $h(x)$ 相对于模糊测度 g 的 Sugeno 模糊积分为

$$\int_E h(x) og(\cdot) = \bigwedge_{i=1}^n \{ \vee [h(x_i), g(A_i)] \} \quad (6)$$

$h(x)$ 相对于模糊测度 g 的 Choquet 模糊积分为

$$\int_E h(x) og(\cdot) = \sum_{i=1}^n [h(x_i) - h(x_{i+1})] g(A_i) \quad (7)$$

其中 $h(x_{n+1}) = 0, h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n)$, $A_i = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$, 当 g_λ 是模糊测度时,设模糊密度 $g^i = \{g(x_i)\}$, 则 $g(A_i)$ 可由递推公式计算得到

$$\begin{cases} g(A_1) = g(x_1) = g^1 \\ g(A_i) = g^i + g(A_{i-1}) + \lambda g^i g(A_{i-1}) \end{cases} \quad (8)$$

λ 可由如下方程得到:

$$\begin{aligned} \lambda + 1 &= \prod_{i=1}^n (1 + \lambda g^i) \\ \lambda &> -1 \text{ 且 } \lambda \neq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Choquet 模糊积分的特点是将主要因素和次要因素综合考虑. 本文采用 Choquet 模糊积分方法,将发动机故障强度因子大的故障模式作为主要因素,强度因子小的故障模式作为次要因素,对发动机可靠性指标 MTBF 进行综合评估.

3.2 模糊密度的确定

在进行模糊积分运算时,首先要确定模糊密度 g^i ,模糊密度实际上反映了信息源 i 提供的信息在融合判决中的重要程度,是确定模糊积分融合效果的关键.模糊密度可以由人工经验确定,它们反映了专家或者经验数据对于对象特征的重视程度,如多故障模式数据融合中的“经常发生”比“偶尔发生”的故障重要,则“经常发生”的密度值就高.模糊密度也可由实际数据中得出,故障强度因子 k 反映了样本在可靠性指标评估中的“滞后”程度,本文根据故障强度因子对模糊密度进行推算,算法为

$$g^i = \frac{k_i}{c \sum k_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中 k_i 表示第 i 个故障模式的故障强度因子, c 为模糊密度的调节参数.

确定模糊密度后就可以根据式(8)和式(9)确定模糊测度,最后根据 Choquet 模糊积分算法进行发动机可靠性指标的动态融合.

3.3 模糊积分融合的算法

利用模糊积分对多源信息融合的算法如下:

- 1) 给定模糊密度初值 g^i ;
- 2) 确定可测 $h(x_i)$ 函数;
- 3) 计算 λ ;
- 4) 求出模糊测度 $g(A_i)$;
- 5) 计算模糊积分值,确定融合结果.

多源信息融合系统的示意图见图 2.

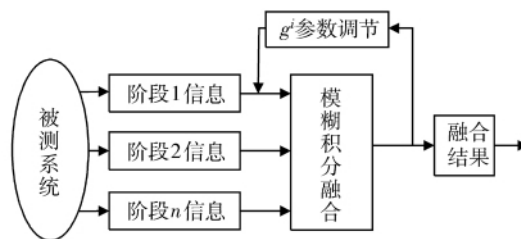


图 2 多源信息融合系统

Fig. 2 Multi-source information fusion system

4 应用实例

某型航空发动机在研制的不同阶段出现过 3 起重大故障,第 1 阶段发生涡轮叶片断裂故障,第 2 阶段发生燃烧室积炭故障,第 3 阶段发生转静子碰摩故障.各阶段都积累了一定的故障数据,现对发动机当前可靠性综合水平给出一个科学的评价,综合利用各阶段数据对发动机 MTBF 进行评定.

设 $\{x_1, x_2, x_3\} = \{\text{涡轮叶片断裂, 燃烧室积炭, 转静子碰摩}\}$. 对各阶段的故障数据进行分布检验、参数估计,建立分布模型,采用分布计算法得到发动机各阶段 MTBF 指标值如表 1 所示,其中 T_{bf} 为可靠性指标.

表 1 发动机 MTBF 指标
Table 1 MTBF factors of aeroengine

编号	故障模式	分布类型	T_{bf}/h
x_1	涡轮叶片断裂	威布尔分布	63
x_2	燃烧室积炭	正态分布	54
x_3	转静子碰摩	正态分布	33

发动机可靠性水平不断提高导致故障强度因子的不断变化.3 种故障模式都得到了标准纠正,

3 种故障模式的故障强度因子变化如图 3 所示。

故障强度因子随着时间的推移呈下降趋势，按照标准降半正态型分布计算发动机在 $t=3$ 时刻的故障强度因子如表 2 所示。

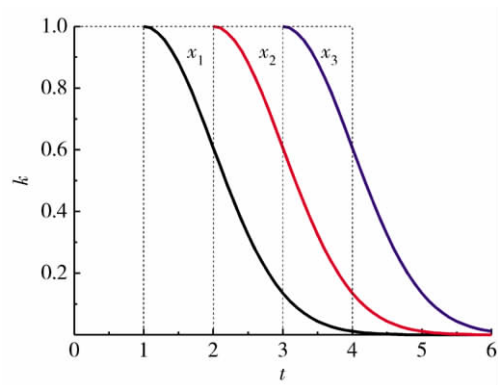


图 3 涡扇发动机故障强度因子

Fig. 3 Failure intensity factor of turbofan engine

表 2 涡扇发动机故障强度因子 ($t=3$)

Table 2 Failure intensity factor of turbofan engine ($t=3$)

故障模式	k_i
x_1	0.136
x_2	0.607
x_3	1.0

在进行模糊积分运算时,确定模糊密度 g^i 和可测函数 $h(x_i)$ 是最关键的两个环节。模糊密度实际上反映了信息源 i 提供的信息在融合判决中的重要程度。航空发动机可靠性指标融合中,故障强度因子反映出对发动机当前可靠性水平的影响程度,故障强度因子越大,在可靠性评估中的重要性越大。因此,模糊密度可由故障强度因子进行计算,根据公式(10)得到各故障模式的模糊密度 g^i 如表 3 所示。可测函数 $h(x_i)$ 可由发动机各阶段故障数据评定的 MTBF 指标值经归一化得到,结果如表 3 所示。

表 3 发动机模糊积分计算参数

Table 3 Parameters of aeroengine fuzzy integral

故障模式	g^i	$g(A_i)$	$h(x_i)$
x_1	0.098	0.098	0.42
x_2	0.435	0.507	0.36
x_3	0.717	1.0	0.22

根据 Choquet 模糊积分计算公式得到

$$\int_E h(x)og(\cdot) = \sum_{i=1}^n [h(x_i) - h(x_{i+1})]g(A_i) = 0.297$$

由此得到发动机在 $t=3$ 时刻的可靠性指标为

$$T_{bf} = 44.5(h)$$

5 结 论

本文采用 Choquet 模糊积分数据融合方法,利用不同阶段故障样本对具有变母体特征的航空发动机可靠性指标进行了动态评估,并对某在研的小型涡扇发动机进行了应用研究。本文的研究方法能更加真实地反映发动机当前的可靠性水平,克服了传统取平均值方法的弊端,为研制阶段的航空发动机可靠性评估提供一种方法。

参考文献:

- [1] 洪杰,王大伟,马艳红. 航空发动机可靠性评估中故障样本时效性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(12): 1464-1467.
HONG Jie, WANG Dawei, MA Yanhong. Time effectiveness analysis of fault samples for aero-engine reliability assessment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(12): 1464-1467. (in Chinese)
- [2] 王大伟,马艳红,洪杰. 基于危害度航空发动机可靠性评估模型及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(8): 883-886.
WANG Dawei, MA Yanhong, HONG Jie. Reliability assessment model and application for aero-engine based on criticality method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(8): 883-886. (in Chinese)
- [3] 金向明,高德平,赵艳云. 基于可靠性增长预测模型的航空发动机可靠性评估[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1335-1339.
JIN Xiangming, GAO Deping, ZHAO Yanyun. Reliability assessment of aero-engine based on the reliability growth forecast module [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1335-1339. (in Chinese)
- [4] 刘永峰,郑海鹰. 无失效数据的统计分析[J]. 浙江大学学报:理学版, 2012, 39(3): 273-277.
LIU Yongfeng, ZHENG Haiying. Statistical analysis about zero-failure date[J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition, 2012, 39(3): 273-277. (in Chinese)
- [5] DU Jiong, FANG Xiangzhong. Tolerance interval for exponential distribution[J]. Frontiers of Mathematics in China, 2011, 6(6): 1059-1066.
- [6] Pham H, Lai C D. On recent generalizations of the Weibull distribution[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2007, 56(3): 454-458.

- [7] 徐自力,姜兴渭. 威布尔分布三参数置信限估计及分布类型检验[J]. 航空学报, 1996, 17(4): 477-479.
XU Zili, JIANG Xingwei. The estimation of confidence limit of Weibull three parameter distribution and examination of distribution type[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(4): 477-479. (in Chinese)
- [8] Sugeno M. Theory of fuzzy integrals and its applications [D]. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 1974.
- [9] Chiang J H. Aggregating membership values by a Choquet-fuzzy-integral based operator[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114(3): 367-375.
- [10] Tseng F, Hu Y. Partitioned fuzzy integral nested logit model for the Taiwan's internet telephony market[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2009, 86(8): 1283-1299.
- [11] 黄洁,李弼程,赵拥军. 基于 Choquet 模糊积分的目标威胁评估方法[J]. 信息工程大学学报, 2012, 13(1): 18-21.
HUANG Jie, LI Bicheng, ZHAO Yongjun. Target threat assessment based on Choquet fuzzy integral[J]. Journal of Information Engineering University, 2012, 13(1): 18-21. (in Chinese)
- [12] Tahani H, Keller J M. Information fusion in computer vision using the fuzzy integral[J]. Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1990, 20(3): 733-741.
- [13] Auephanwiriyakul S, Keller J M, Gader P D. Generalized Choquet fuzzy integral fusion [J]. Information Fusion, 2002, 3(1): 69-85.
- [14] Yang R, Wang Z Y, Heng P A. Fuzzy numbers and fuzzification of the Choquet integral[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 153(1): 95-113.
- [15] 黄景德,郝学良. 基于模糊积分的潜隐性故障状态转移过程分析[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(6): 68-71.
HUANG Jingde, HAO Xueliang. State transition process of hidden failures based on fuzzy integral[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2011, 32(6): 68-71. (in Chinese)