航空发动机可靠性评估中故障样本时效性分析

洪 杰 王大伟 马艳红

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院，北京 100191)

摘 要：通过故障数据建立可靠性模型反映系统可靠性状态的变化具有一定的滞后性，随着发动机可靠性水平的不断提高，对航空发动机进行可靠性评估需要将早期故障样本进行时效性处理. 提出衰减因子 α 用于表示故障强度的衰弱程度，对 Gompertz 可靠性增长模型改进得到故障的衰减函数，来描述故障强度的衰弱过程；用 Bayes 方法合理利用发动机全部故障样本进行数据融合，可有效解决样本的时效性问题. 对在研的某涡扇发动机进行故障统计分析，研究了典型故障模式的时效性变化，结果表明：考虑样本的时效性后进行可靠性评估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；可靠性评估；故障样本；时效性

中图分类号：TB 114

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)12-1464-04

Time effectiveness analysis of fault samples for aero-engine reliability assessment

Hong Jie Wang Dawei Ma Yanhong

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

Abstract: It is hysteretic to use reliability model which is set up based on failure data to reflect the changes of system reliability condition. With the enhancement of reliability level, the early failure samples should be processed time effectively in aero-engine reliability assessment. An attenuation factor α was proposed to express the attenuation grade of failure intensity. The attenuation function that describes the attenuation process was captured by improving Gompertz reliability growth model. All useful information was utilized by using Bayes data fusion methods for time effectiveness of samples. A new acquisition turbo-fan engine was statistically analyzed by this model, and the time effectiveness of fault samples for typical failure was studied. The result indicates that this model could provide more scientific evaluation of aero-engine's reliability.

Key words: aero-engine; reliability assessment; fault sample; time effectiveness

为提高航空发动机可靠性评估的准确性需要研究更合理的评估方法. 在航空发动机研制阶段，随着设计的改进或材料、工艺水平的提高，发动机的系统是变化的，这就使得不同阶段的故障样本属于动态统计母体. 如果用一成不变的观点把全部样本数据直接作为可靠性评估依据，就会使评估结果失真而不能反映出发动机当前真实的可靠性水平. 航空发动机故障样本具有时效性，尤其是在研制阶段的故障样本的时效性特征更加显著. 时效性是样本在可靠性评估中表现出的时间效应，即样本在可靠性评估中的作用强弱的变化. 对于某一故障模式，在发动机当前阶段仍然发生，那么它对发动机可靠性评估属于“强样本”，如果针对此故障模式已经采取措施，且当前阶段可能不再发生或很少发生，那么此时它对发动机可靠性评估就属于“弱样本”. “弱样本”不能直接用作可

收稿日期：2008-11-28

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：洪 杰(1965—)，男，北京人，教授，hongjie@buaa.edu.cn.

靠性评估,因此,只有合理地考察故障的排除情况,对样本进行时效化处理,充分准确地利用发动机研制过程中的全部信息进行可靠性评估,才能对发动机当前的可靠性水平给予科学的评价.

1　故障衰减因子

引入衰减因子 α 表示故障强度的衰弱程度.确定故障衰减因子的前提是失效机理不变和分布类型不变.设 $F_1(t_1)$ 和 $F_2(t_2)$ 分别为某故障在前后 2 个阶段工作 t_1 和 t_2 后的累积失效概率.衰减因子的计算原则为

$$F_1(t_1)=F_2(t_2) \tag{1}$$

按照此计算原则,可以推导出不同分布类型下衰减因子的计算公式.

1.1　威布尔分布

Weibull 分布在航空发动机可靠性评估中有着广泛的应用,一般寿命损耗型的故障都可以用 Weibull 分布描述.Weibull 分布下失效机理不变的前提条件是形状参数相同($m_1=m_2=m$).Weibull 分布场合下两个不同阶段故障的寿命分布分别为

$$F_i(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^m\right] \quad i=1,2 \tag{2}$$

根据折算原则(1)得到故障符合 Weibull 分布情况下衰减因子为

$$\alpha=\eta_1/\eta_2 \tag{3}$$

式中,η_1,η_2 分别为前后两个阶段 Weibull 分布的尺度参数.

1.2　指数分布

航空发动机某些故障符合指数分布特性,如漏油故障、电子产品故障等.在指数分布场合下,记 t 为产品寿命,2 个不同阶段故障概率密度函数为

$$f(t,\lambda_i)=\lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad t>0,\lambda_i>0 \tag{4}$$

根据折算原则(1)得到故障符合指数分布情况下衰减因子为

$$\alpha=\frac{\theta_1}{\theta_2}=\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tag{5}$$

式中,θ_i,λ_i 分别为前后两个阶段指数分布的平均寿命和失效率.

1.3　对数正态分布

在对数正态分布场合下,记 t 为产品寿命,两个不同阶段故障概率密度函数为

$$F_i(t)=\Phi\left(\frac{\ln t-\mu_i}{\sigma}\right) \quad i=1,2 \tag{6}$$

式中,$\Phi(x)$为标准正态分布函数.

按折算原则(1)得到故障符合对数正态分布情况下衰减因子为

$$\alpha=\exp(\mu_2-\mu_1) \tag{7}$$

2　故障衰减函数

对于航空发动机这种复杂系统用线性衰减函数有时不能准确描述故障的排除过程,因此需要确定合理的故障衰减函数.根据发动机故障特点,衰减过程具有明显的非线性特征,在故障分析、研究,制定排除方案过程中,故障衰减因子变化缓慢,当故障排除后故障强度迅速变弱,即衰减因子快速下降,在故障排除一定阶段后,衰减因子的下降速度又开始变慢.

为描述故障衰减特征,引入 Gompertz 可靠性增长模型.Gompertz 可靠性增长模型是从时间序列分析中引用过来的,是描述增长过程的一种手段[1-2].Gompertz 曲线的特点是,起初增长较慢,随后逐渐加快,但增加到一定程度以后,增长速度又开始减慢.Gompertz 曲线也可以用于描述开始增长较快,增长到一定程度速度又逐渐变慢的过程.不少产品在研制阶段和使用初期的可靠性符合这 2 种增长趋势,因此,Gompertz 模型应用相当广泛,它既适用于成败型试验信息,也适用于寿命型试验信息,既可应用于一般设备,也可用于大型复杂系统.

Gompertz 模型可以用来建立一种逐步评定产品当前可靠性及预测未来可靠性的方法,是一种离散的增长模型.产品在时间 t(t 可以是增长次数等)的可靠性为 $R(t)$,Gompertz 模型可写为

$$R(t)=ab^{c^t} \tag{8}$$

式中,$0<a<1$,$0<b<1$,$0<c<1$,a,b,c 的工程物理意义如下:因 $\lim\limits_{t\to\infty}R(t)=a$,故 a 是产品可靠性增长的上界.而 $\lim\limits_{t\to\infty}R(t)=ab$,故 ab 是产品可靠性的初始水平.由于 $\lim\limits_{t\to\infty}R(t)/\lim\limits_{t\to\infty}R(t)=b$,故 b 是初始可靠性与极限可靠性之比.参数 c 反映增长速度,c 值越小增长速度越快;c 值越大增长速度越慢.

可靠性增长的效用在于使产品的可靠性得到确实的提高[3].尤其是列为工作项目,有计划有目标的可靠性增长,可以使新研制的复杂产品从较低的可靠性水平逐步提高到目标值.样本时效性研究的效用在于正确评估样本在研制阶段或可靠性增长过程中所起的强弱变化,从而对系统当前可靠性水平给出科学的评价.

利用 Gompertz 增长模型的函数特性,对 Gompertz 增长模型进行改进,构造故障的衰减函

数.故障衰减函数的表达式为

$$\alpha(t)=d-ab^{c^t} \tag{9}$$

式中,$0<a,b,c,d<1$.

用衰减函数描述故障衰减因子的衰弱过程,如图1所示.在发动机排故阶段衰减因子α衰减缓慢,当故障排除后,α快速衰减,当减小到一定程度,也就是故障排除后相当长时间,α衰减速度又变慢.α衰减速度取决于故障的排除情况.

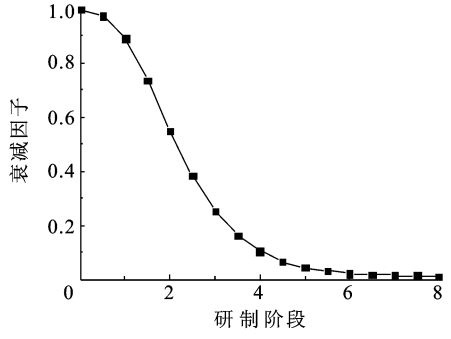


图1 故障衰减因子

航空发动机的研制过程是一个设计、制造、使用、改进迭代,可靠性水平逐步提高的过程.在发动机可靠性水平提高的过程中伴随着样本的时效性变化,因此时效性处理也可分阶段考察.样本的时效性处理过程可分为以下4个状态.

状态1:故障频繁发生,样本表现强;

状态2:故障偶尔发生,样本表现中;

状态3:故障基本不发生,样本表现弱;

状态4:故障完全不发生,样本表现极弱.

由故障衰减函数确定各状态故障的衰减因子,由衰减因子对样本进行时效化处理就可以得到某故障模式样本当前的转化概率分布.例如服从威布尔分布的故障样本,随着此故障的排除,在各状态时的转化概率分布密度曲线如图2所示.

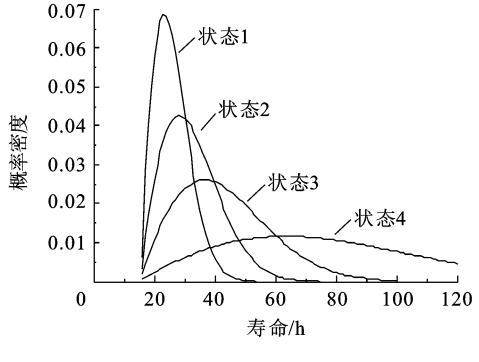


图2 故障密度函数的衰弱过程

3 Bayes数据融合

确定故障衰弱程度后需要将"弱样本"与"强样本"融合对发动机进行可靠性评估.Bayes方法是一种有效的多源数据融合方法[4-5],Bayes数据融合的基本思想,是利用先验信息融合样本数据得到后验分布.先验信息表示在获得样本数据前对未知参数的认识,有了样本数据带来新的信息后,对先验信息的认识有了改变,最后根据后验分布进行可靠性评估.

连续情形下的Bayes公式[6]

$$\pi(\theta\mid X)=\frac{\pi(\theta)L(X\mid\theta)}{\int_{\Theta}\pi(\theta)L(X\mid\theta)\mathrm{d}\theta} \tag{10}$$

式中,$L(X|\theta)$为给定分布参数θ之下的X的概率密度函数;$\pi(\theta)$为θ的验前密度函数;$\pi(\theta|X)$为在给定X下条件密度函数;Θ为参数的空间.具体在故障统计中,如果将X看成是试验样本,$L(X|\theta)$就是给定θ后样本的密度函数,称为样本似然函数.$\pi(\theta)$反映了试验前对θ的认识,$\pi(\theta|X)$为试验后(获得故障样本后)对θ概率分布特性新的认识,为后验分布.图3直观地描述了Bayes融合方法的实现过程.

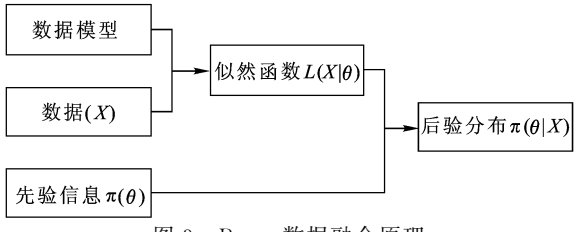


图3 Bayes数据融合原理

总体可靠性指标是"强样本"与"弱样本"综合作用的结果,都会对总体可靠性指标产生影响.使用Bayes数据融合的前提是各数据源相互独立,在这个假设的基础上发动机"强样本"与"弱样本"独立作用于发动机,因此可以把"弱样本"作为先验信息,当前发动机的"强样本"作为样本数据,与先验信息融合得到后验分布,根据后验分布进行可靠性推断.这样得到的后验分布考虑了发动机样本的时效性变化,更能反映出发动机当前的可靠性水平.

4 某涡扇发动机可靠性评估实例

对于某型航空涡扇发动机,其设计技术成熟,工艺要求详尽,但在发动机试验和使用的初期阶段,系统性能不稳定,样本的时效性变化显著.发动机典型故障的衰减因子如图4所示.

该型发动机一些故障模式,如轴承故障,是整批故障轴承装备了发动机,后期更换了全部故障轴承,当前发生轴承故障的概率很小,故障的衰减

因子衰弱较大,时效性变化显著.因此,轴承故障样本对后期发动机可靠性评估的作用减弱.而漏油故障相对解决的不好,漏油故障在发动机的各阶段都时有发生,故障衰减因子衰弱不明显.因此,漏油故障样本对后期发动机可靠性评估的作用表现强.

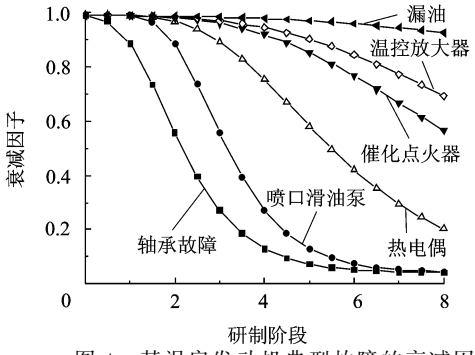


图 4　某涡扇发动机典型故障的衰减因子

考察发动机第 7 阶段的可靠性水平,各故障模式的分布参数和衰减因子如表 1 所示.

表 1　涡扇发动机故障模式和衰减因子

故障模式	分布类型	分布参数	衰减因子
漏油故障	威布尔	$t_0=10.7, m=1.3, \eta=95$	0.99
温控放大器故障	威布尔	$t_0=21.1, m=1.2, \eta=132$	0.78
催化点火器故障	威布尔	$t_0=15.5, m=1.5, \eta=116$	0.68
热电偶故障	威布尔	$t_0=19.5, m=1.4, \eta=145$	0.30
喷口滑油泵故障	威布尔	$t_0=11.0, m=1.5, \eta=109$	0.06
轴承故障	威布尔	$t_0=16.0, m=2.3, \eta=101$	0.05

用 Bayes 方法融合此发动机全部故障模式,得到发动机的后验分布为 Weibull 分布,其分布的概率密度函数和参数为

$$f(x)=\frac{m}{\eta}\left(\frac{x-t_0}{\eta}\right)^{m-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{x-t_0}{\eta}\right)^m}$$

$$t_0=20.1 \qquad m=1.8 \qquad \eta=108.8$$

根据后验分布进行可靠性评估,得到发动机综合可靠性指标为

$$T_{\mathrm{BF}}=116.4\ \mathrm{h}$$

置信度 90%时区间置信下限为

$$T_{\mathrm{BFL}}=104.2\ \mathrm{h}$$

此发动机在研制的初级阶段,整体可靠性水平逐步提高,考虑故障的时效性对发动机进行可靠性评估能正确反映发动机当前的可靠性水平.相比之下,不考虑样本时效性问题,把全部故障直接用来可靠性评估,得到

$$T_{\mathrm{BF}}=103.3\ \mathrm{h}$$

置信度 90%时区间置信下限为

$$T_{\mathrm{BFL}}=93.2\ \mathrm{h}$$

可见,不考虑样本时效性对发动机评估结果偏保守.

5　结 束 语

航空发动机的研制过程是一个设计、制造、使用、改进迭代,可靠性水平逐步提高的过程,在这个过程中发动机的故障样本具有明显的时效性特征.因此,对发动机进行可靠性评估,不但要考虑故障的危害性、失效模式等,还要考虑故障样本的时效性.本文引入故障衰减因子表示故障强度的衰弱程度,对 Gompertz 可靠性增长模型改进得到故障的衰减函数描述故障强度的衰弱过程,用 Bayes 方法融合发动机全部样本数据进行可靠性评估.需要说明,在发动机研制阶段,系统的技术状态可能变化较大,时效性分析应该建立在系统技术状态一致性的基础上.通过对在研的国产某型涡扇发动机的时效性研究表明,考察样本的时效性进行可靠性评估可以充分利用研制过程中全部信息进行可靠性评估,能对发动机当前的可靠性水平能给予更加科学的评价.

参考文献(References)

[1] Virene E P. Reliability growth and its upper limit[C] // Proceedings Annual of Symposium on Reliability. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1968: 265－270

[2] Kececioglu D, Siyuan J, Pantelakis V. The modified Gompertz reliability growth mode[C] // Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. Anaheim, California: New Jersey, 1994: 160－165

[3] 周源泉,翁朝曦. 可靠性评定[M]. 北京:科学出版社,1990: 45－66
Zhou Yuanquan, Weng Chaoxi. Reliability assessment[M]. Beijing: Science Press, 1990: 45－66(in Chinese)

[4] Elperin T, Gertsbakh I. Bayes credibility estimation of an Exponential parameter for random censoring & incomplete information[J]. IEEE Trans on Reliability, 1990, 39(2): 204－208

[5] Arturo J F. Bayesian inference from type Ⅱ doubly censored Raleigh data[J]. Statistics & Probability Letters, 2000, 48: 393－399

[6] 张尧庭. 贝叶斯统计推断[M]北京:科学出版社,1991: 78－86
Zhang Yaoting. Bayesian statistical inference[M]. Beijing: Science Press, 1991: 78－86(in Chinese)

(编　辑:刘　晔)