

文章编号:1000-8055(2013)05-1006-07

基于 Wiener 过程的民用航空发动机性能 可靠性预测

朱 磊, 左洪福, 蔡 景

(南京航空航天大学 民航/飞行学院, 南京 210016)

摘 要: 通过对民用航空发动机性能退化数据的分析,提出了一种有效融合先验退化数据和现场退化数据的性能可靠性评估和剩余寿命预测方法.首先在先验退化数据的基础上确定 Wiener 过程参数的先验分布,然后利用贝叶斯方法融合新增的现场数据,对 Wiener 过程参数进行更新,并在此基础上对单台发动机进行性能可靠性评估和剩余寿命预测.该方法能根据现场退化数据不断地对可靠性和剩余寿命进行更新.最后通过某航空公司发动机性能退化数据验证文中提出的方法,结果表明 41 号发动机在 2000 循环和 3000 循环时预测的剩余寿命相对误差分别为 0.060 和 0.018,可以满足航空公司发动机下发计划制定的实际需要.

关 键 词: 可靠性; Wiener 过程; 贝叶斯理论; 民用航空发动机; 性能退化

中图分类号: V37.1

文献标志码: A

Performance reliability prediction for civil aviation aircraft engine based on Wiener process

ZHU Lei, ZUO Hong-fu, CAI Jing

(College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With respect to degradation data of civil aviation aircraft engine, a method which combined prior degradation information with current degradation data was proposed to assess performance reliability and residual life. Firstly, on the basis of prior degradation information, prior distributions of Wiener process parameters were confirmed. Secondly, by using Bayesian method, prior distributions could be updated to posterior distributions, and then the reliability and residual life of an engine were evaluated based on the posterior distributions. The proposed method can update the evaluation results of reliability and residual life whenever new degradation data is available. Finally, a practical example of degradation data of civil aviation aircraft engine was used to testify the validity of the proposed model. The result shows that the deviation of No. 41 engine in 2000 cycles and 3000 cycles is 0.060 and 0.018, which satisfies the management requirement of engine fleet of airlines.

Key words: reliability; Wiener process; Bayes theory; civil aviation aircraft engine; performance degradation

收稿日期: 2012-05-31

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130508.0949.201305.1006_007.html

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合项目(60939003); 国家自然科学基金(61079013);

江苏省自然科学基金(BK2011737)

作者简介: 朱磊(1984—),男,江苏南京人,博士生,主要从事航空发动机可靠性与维修管理方面的研究.

发动机是飞机的核心,其健康状态对保证飞行安全和降低航空公司的运营成本具有十分重要的意义。民用航空发动机具有高可靠性、长寿命等特点,其性能可靠性评估和在翼寿命预测是发动机健康管理的重要课题。传统的可靠性评估方法是建立在大量的失效样本的基础上的,对于民用航空发动机而言,由于其造价高昂,失效数据极少,难以利用传统的可靠性理论进行可靠性评估和寿命预测。同时,在航空公司发动机运营过程中积累了大量的发动机性能退化的信息,研究利用这些性能退化信息,结合性能可靠性理论与方法,为发动机性能可靠性评估和在翼寿命预测提供了一条新的途径,从而解决可靠性理论与工程实际不相适应的问题。

根据退化机理的不同,目前国内外已经建立了多种退化过程模型,如随机变量模型、边缘分布模型、累积损伤模型、Gamma 过程、Wiener 过程等,在这些模型的基础上研究了基于退化数据的退化失效产品可靠性建模方法。Wiener 过程模型由于自身计算的优势,是目前基于性能退化的可靠性建模与分析中最基本、应用最广的模型之一。Cox 和 Miller^[1]提出了首达时间分布可以用服从逆高斯分布表示,随后 Doksum 和 Hoyland^[2]将非静态 Wiener 过程转变为静态 Wiener 过程,并将 Wiener 过程运用于可变应力加速寿命试验模型。Whitmore 等^[3-4]将测量误差引入 Wiener 退化过程。Park 和 Padgett 等^[5-6]采用 Wiener 过程对碳膜电阻的阻值退化过程进行建模;赵建印等^[7]在分析电容器失效机理的基础上给出其耗损失效模型,推导出失效概率密度及分布函数,用电容器的性能衰退数据分析其可靠性。厉海涛等^[8]针对动量轮寿命预测无失效数据问题,利用有漂移的 Wiener 过程对其轴承温度建立性能退化模型。周经伦等^[9]应用随机变量来刻画 Wiener 过程漂移参数和扩散参数,以某航天长寿命机电部件为研究对象,考虑 Wiener 过程退化建模与分析中加工工艺、运行环境等因素造成的个体间的差异,并给出了参数和可靠寿命的自助估计方法。王小林等^[10]研究了测量导致的设备性能退化量不可忽略时,基于 Wiener 过程建立有损测量的设备退化过程,给出了相应模型的参数估计方法和基于贝叶斯理论的设备剩余寿命的实时更新方法。齐建军等^[11]以 Wiener 过程模型为基础,提出以累积工作时间和备用时间同时作为自变量的建模方法,研究了加注泵的性能可靠性评估方法。任淑红

等^[12]通过分析发动机性能退化过程,建立了基于带漂移的布朗运动的可靠性模型,利用布朗运动特性研究了基于当前状态的退化时间预测方法。

通过上面的文献分析可以看出,目前 Wiener 过程模型已经被运用于退化产品可靠性建模和寿命预测问题,然而对于个体的可靠性与剩余寿命预测的相关研究相对较少。对于航空公司,如何利用已有的机队发动机性能退化数据准确估计和预测单台发动机在使用过程中的可靠性与剩余寿命是航空公司面临的难题。针对这一问题,本文首先采用 Wiener 过程对航空公司发动机机队整体性能退化过程进行建模,在此基础上,融合性能退化数据,结合贝叶斯理论实现对单台发动机可靠性和剩余寿命的预测。最后,通过国内某航空公司的一个例子说明本文方法的实用性和研究意义。

1 基于 Wiener 过程的航空发动机机队性能退化模型

1.1 Wiener 过程

Wiener 过程主要用来对平稳独立高斯增量的性能退化过程进行建模,如果一元连续时间随机过程 $\{W(t); t \geq 0\}$ 满足以下性质:

- 1) 时刻 t 到时刻 $t + \Delta t$ 之间的增量服从正态分布,即 $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t) \sim N(\mu\Delta t, \sigma^2\Delta t)$;
 - 2) 对于任意两个不相交的时间区间 $[t_1, t_2]$, $[t_3, t_4]$, 且 $t_1 < t_2 \leq t_3 < t_4$, 增量 $W(t_4) - W(t_3)$ 与 $W(t_2) - W(t_1)$ 相互独立;
 - 3) $W(0) = 0$ 并且 $W(t)$ 在 $t = 0$ 处连续。
- 则称 $W(t)$ 为一元 Wiener 过程。特别地, $\sigma = 1$ 的 Wiener 过程称为标准 Wiener 过程,记为 W_0 。

1.2 航空发动机机队性能退化模型的建立

发动机排气温度裕度(EGTM)是衡量发动机健康状态的一项辅助参考指标,同时也是被航空公司采用的发动机换发的依据和重要的性能指标。EGTM 定义为发动机在海平面压力、拐点温度条件下,做全功率起飞时,发动机排气温度(EGT)值与 EGT 红线值之间的差值,同时要求起飞过程中飞机正常引气,发动机整流罩防冰和大翼防冰关闭。通常当排气温度裕度退化到其阈值时,发动机便会下发送修。因此,可以通过分析排气温度裕度的退化规律来评估发动机的性能可靠性,预测发动机的剩余寿命。由于发动机某一时刻的性能退化量也是随机的,受使用环境、维修、

部件损伤等因素综合作用的作用,可以利用一些随机过程模型来描述发动机的性能退化过程。

由于发动机排气温度裕度值通常随着发动机使用循环和飞行小时的增加而减少,所以可以将发动机 t 时刻的性能退化量 $W(t)$ 表示为 $W(t) = l - E$, 其中 E 代表 EGTM, l 为同一型号发动机送修返回后排气温度裕度值恢复到同一值。通常 EGTM 值为 0 时发动机必须下发返厂修理,此时发动机的性能退化量 $W(t) = l$ 达到最大。

发动机 t 时刻的性能退化量 $W(t)$ 是服从某一分布的随机变量,因此过程 $\{W(t); t \geq 0\}$ 是一个随机过程,如果发动机性能退化过程 $W(t)$ 可以用 Wiener 过程表示,即

$$W(t) = \mu t + \sigma W_0(t) \quad (1)$$

称其参数 μ 为漂移参数, σ 为扩散参数, $W_0(t)$ 为标准 Wiener 过程,且 $E[W(t)] = \mu t, D[W(t)] = \sigma^2 t$ 。

1.3 航空发动机机队性能退化符合 Wiener 过程的检验

设共有 m 台发动机的性能退化样本,对于第 i 台发动机,初始时刻 t_{i0} 性能退化量为 $W_{i0} = 0$,在时刻 $t_{i1}, \dots, t_{iq_i}$ 得到的发动机性能退化量分别为 $W_{i1}, \dots, W_{iq_i}$,其中 q_i 表示第 i 台发动机第 q_i 次的发动机性能退化测量。设 $\Delta W_{ij} = W_{ij} - W_{i(j-1)}$ 是发动机 i 在时刻 $t_{i(j-1)} \sim t_{ij}$ 的性能退化量,由 Wiener 过程的性质

$$\Delta W_{ij} \sim N(\mu \Delta t_{ij}, \sigma^2 \Delta t_{ij})$$

其中 $\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{i(j-1)}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, q_i$, 根据式(1)有

$$\begin{aligned} W_{ij} &= \\ W_{i(j-1)} + \mu \Delta t_{ij} + \sigma [W_0(t_{ij}) - W_0(t_{i(j-1)})] &= \\ W_{i(j-1)} + \mu \Delta t_{ij} + \sigma \Delta W_0(t_{ij}) \end{aligned}$$

$W_0(t)$ 是标准 Wiener 过程,所以在时间上的小增量 Δt 内满足 $\Delta W_0(t_{ij}) = \varepsilon \sqrt{\Delta t}$, 其中 ε 是一个标准正态随机变量,因此上式可变为

$$W_{ij} = W_{i(j-1)} + \mu \Delta t + \sigma \varepsilon_{ij} \sqrt{\Delta t}$$

利用 Monte Carlo 法模拟发动机性能退化数据,其具体步骤见文献[13],可以得到一组波动遵循 Wiener 过程的数据。构造如下参数 k ,它是实际性能退化量波动与模拟退化量波动之差的函数,其计算公式为

$$k = [(W_{ij} - W_{i(j-1)}) - (W'_{ij} - W'_{i(j-1)})] \frac{1}{\sigma \sqrt{2\Delta t}}$$

通过采用 SPSS(statistical product and service solutions)软件中的 Shapiro-Wilk 法,检验 k 是否符合标准正态分布,即可说明实际退化量变化数据是否服从 Wiener 过程。如果统计量确定的概率 P 值大于 0.05,表明服从正态分布。

1.4 模型的参数估计

由发动机性能退化过程 $W(t) = \mu t + \sigma W_0(t)$ 的模型,需要通过发动机性能数据样本估计模型的参数 μ 和 σ ,可以得到性能退化的似然函数为

$$g(\Delta W | \mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^{q_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 \Delta t_{ij}}} \exp \left[-\frac{(\Delta W_{ij} - \mu \Delta t_{ij})^2}{2\sigma^2 \Delta t_{ij}} \right]$$

由上式,分别对 μ, σ 求偏导,可以得到

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \frac{\sum_{i=1}^m W_{iq_i}}{\sum_{i=1}^m t_{iq_i}} \hat{\sigma}^2 = \\ \frac{1}{\sum_{i=1}^m q_i} \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} \frac{(\Delta W_{ij})^2}{\Delta t_{ij}} - \frac{(\sum_{i=1}^m W_{iq_i})^2}{\sum_{i=1}^m t_{iq_i}} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

2 单台发动机性能可靠性与剩余寿命分布的更新与预测

2.1 贝叶斯更新

由于发动机性能数据具有随机性,需要根据最新的性能退化数据对单台发动机的剩余寿命进行更新,从而及时掌握单台发动机性能,提高性能可靠性与剩余寿命预测的精度,控制非计划下发的风险,同时也为发动机的备发和换发提供数据支持。为了对单台发动机剩余寿命进行更新,首先需要对其中的参数进行更新。在获得单台发动机的退化数据 $x = [x_{ij}]$ 后,根据贝叶斯的基本原理

$$\begin{aligned} f(\mu, \theta | x) &= \\ \frac{g(x | \mu, \theta) f(\mu) f'(\theta)}{\int_{D(\mu)} \int_{D(\theta)} g(x | \mu, \theta) f(\mu) f'(\theta) d\mu d\theta} \end{aligned}$$

其中 $f(\mu), f'(\theta)$ 分别表示 μ 和 θ 的先验概率密度函数, $f(\mu, \theta | x)$ 表示后验概率密度函数, $D(\mu)$ 和 $D(\theta)$ 分别表示 μ 和 θ 取值范围, $g(x | \mu, \theta)$ 为似然函数,设 $\sigma^2 = 1/\theta^2$, 通常检测的间隔相同,即 $\Delta t_{ij} = \Delta t, x_{ij} = \Delta W_{ij} / \Delta t$, 则似然函数可以写成

$$g(x | \mu, \theta) = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^{q_i} \frac{\theta^{1/2}}{\sqrt{2\pi\Delta t}} \exp\left[-\frac{\theta(\Delta x_{ij} - \mu\Delta t)^2}{2\Delta t}\right]$$

下面根据 μ 和 θ 的先验分布情况进行讨论。

1) 当 μ 和 θ 的先验分布未知时, 可以假设 μ 和 θ 服从区间上的均匀分布, $f(\mu), f'(\theta)$ 为概率密度分布函数, 则后验概率可以写成

$$f(\mu, \sigma | x) = \frac{g(x | \mu, \sigma) f(\mu) f'(\sigma)}{\int_{-K}^K \int_0^{K'} g(x | \mu, \sigma) f(\mu) f'(\sigma) d\mu d\sigma}$$

由参考文献[14]可以得到

$$f(\mu, \theta | x) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} \sigma^{a-1} \exp(-b\theta) \sqrt{\frac{n\theta}{2\pi}} \exp\left[-\frac{n\theta}{2}(\mu - c)\right] = G(a, b) N\left[c, \frac{1}{\theta(2a-1)}\right] \quad (3)$$

其中 m 台发动机检测得到的退化量次数为 $n =$

$$\sum_{i=1}^m q_i, a = \frac{n+1}{2}, b = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} (x_{ij} - \bar{x})^2, \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} x_{ij}}{\sum_{i=1}^m q_i}, c = \bar{x}. \text{ 可以看出 } \mu \text{ 和 } \theta \text{ 的后验分布是}$$

伽马分布和正态分布的组合。

2) 当 μ 和 θ 的先验分布已知时, 由参考文献[14-15]不妨假设先验分布满足式(3), 则后验分布可以写成

$$f(\mu, \theta | x) = \frac{b'^{a'}}{\Gamma(a')} \theta^{a'-1} \exp(-b'\theta) \sqrt{\frac{n\theta}{2\pi}} \exp\left[-\frac{n\theta}{2}(\mu - c')\right] = G(a', b') N\left[c', \frac{1}{\theta(2a'-1)}\right] \quad (4)$$

其中 $a' = \frac{n}{2} + a, b' = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} (x_{ij} - \bar{x})^2 + b + \frac{n(2a-1)(\bar{x}-c)^2}{2(n+2a-1)}, c' = \frac{n\bar{x} + (2a-1)c}{n+2a-1}.$

2.2 Wiener 过程参数的更新

当后验概率密度函数 $f(\mu, \theta | x)$ 得到之后, 可以通过边缘概率密度计算得到 μ 和 θ 的参数估计. θ 的边缘分布可以写成

$$f(\theta | x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\mu, \theta | x) d\mu f(\theta | x) = G(a', b') \int_{-\infty}^{+\infty} N\left[c', \frac{1}{\theta(2a'-1)}\right] d\mu f(\theta | x) = \frac{b'^{a'}}{\Gamma(a')} \theta^{a'-1} \exp(-b'\theta) = G(a', b')$$

则 θ 的点估计 $\hat{\theta}$ 可以写成

$$\hat{\theta} = \frac{a' - 1}{b'}$$

同样 μ 的边缘分布可以写成

$$f(\mu | x) = \int_0^{+\infty} f(\mu, \theta) d\theta = \frac{b^a \sqrt{2a-1}}{\partial^{a+\frac{1}{2}} \sqrt{2\pi}} \frac{\Gamma\left(a + \frac{1}{2}\right)}{\Gamma(a)} \quad (5)$$

其中 $\partial = b + \frac{1}{2}(2a-1)(\mu-c)^2$, 则 μ 的点估计 $\hat{\mu}$ 可以写成

$$\hat{\mu} = c' = \frac{n\bar{x} + (2a-1)c}{n+2a-1} \quad (6)$$

2.3 性能可靠性与剩余寿命的预测

t 时刻发动机是否发生退化失效是通过判定退化量 $W(t)$ 与失效阈值 l 的大小关系来确定的, 即利用 t 时刻的概率 $P\{W(t) \leq l\}$ 给出. 实际上根据退化失效的定义, 发动机的在翼寿命 T 是退化量 $W(t)$ 首次达到失效阈值 l 的时间, 可以表示成

$$T = \inf\{t | W(t) = l; t \geq 0\}$$

根据参考文献[15-17] T 服从逆高斯分布 $IG(l/\mu, l^2/\sigma^2)$, T 的分布函数和概率密度函数分别为

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\mu t - l}{\sigma \sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu l}{\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{-l - \mu t}{\sigma \sqrt{t}}\right)$$

$$f(t) = \frac{l}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(l - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right]$$

通过 Wiener 过程参数的更新, 得到 μ 和 σ^2 估计的更新值 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}^2$, 其中 $\sigma^2 = 1/\theta^2$. 从而可以得到 t 时刻单台发动机的性能可靠性

$$R(t) = 1 - F(t) = \Phi\left(\frac{l - \hat{\mu} t}{\hat{\sigma} \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\hat{\mu} l}{\hat{\sigma}^2}\right) \Phi\left(\frac{-l - \hat{\mu} t}{\hat{\sigma} \sqrt{t}}\right) \quad (7)$$

如果单台发动机在 τ 时刻的退化量为 w_τ ($w_\tau < l$), 则此时单台发动机的剩余寿命 T_1 可以表示为

$$T_1 =$$

$$\inf\{t | W(t + \tau) \geq l; W(\tau) = w_\tau; t \geq 0\}$$

由一元 Wiener 过程的独立增量性质和齐次马尔可夫性得到

$$T_1 =$$

$$\inf\{t | W(t + \tau) - W(\tau) \geq l - w_\tau; t \geq 0\} = \inf\{t | W(t) \geq l - w_\tau; t \geq 0\}$$

从而剩余寿命 T_1 也是逆高斯分布, 其密度函数只需将寿命 T 的密度函数中的失效阈值 l 替换为 $l - w_\tau$, 即预测得到单台发动机剩余寿命的概率密度函数为

$$f_{T_1}(t) = \frac{l - w_\tau}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} \exp\left[-\frac{(l - w_\tau - \mu t)^2}{2\sigma^2 t}\right] \quad (8)$$

3 实例应用

表 1 给出了某航空公司 41 台某型发动机排气温度裕度数据. 将前 40 台发动机性能数据分为

表 1 航空发动机排气温度裕度数据

Table 1 Aeroengine exhaust gas temperature margin data

循环数	发动机号									
	1	2	3	4	5	...	38	39	40	41
100	76.9	77.7	67	63	70.8	...	67	74	61	69
200	73.7	71.4	61.4	61.4	56.2	...	65	70	65.3	63.3
300	75.5	75.1	56.8	56.8	44.6	...	61.1	65.5	65.8	61.1
400	77.3	78.8	62.2	62.2	49	...	59.8	64	59.6	59.5
500	74.1	72.5	57.6	57.6	53.4	...	58.41	64.9	59	57.6
600	76.9	66.2	58	58	57.8	...	57.8	52.1	53.1	54
700	77.7	59.9	56.4	56.4	52.2	...	47	50.7	53	39.5
800	74.5	53.6	58.8	58.8	56.6	...	47	60.3	49.2	41
900	71.3	47.3	58.2	58.2	36	...	56.3	56.8	49.2	49.6
1000	68.1	45.35	53.6	53.6	14.9	...	48	56	51.9	57.8
1100	64.9	43.85	57	57	26.7	...	54	56	39	48.9
1200	61.7	42.35	59	59	38.9	...	52.8	53.3	25.3	58
1300	58.5	41.5	51	51	51.6	...	56.3	52.2	44.3	56.7
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3800	5.3	2.4	5.7	4.5	3.1		20	18	10.1	31.2
3900	4.5	1.4	3.5	2.9	1.1	...	15.4	12.5	9.1	28.5

将 $\hat{\mu}$ 的平均值作为 $\hat{\mu}$ 的先验估计值, $\hat{\theta}$ 的先验估计值 θ 在 $[\hat{\theta}_{\min}, \hat{\theta}_{\max}]$ 内, $\hat{\theta}_{\min}, \hat{\theta}_{\max}$ 分别表示 $\hat{\theta}$ 估计值的最小和最大值, 由式(3)得 θ 的边缘分布可以写成

$$f(\theta | x) = \frac{b^a \theta^{a-1} e^{-b\theta}}{\Gamma(a)} = G(a, b)$$

$[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 可以认为是均匀分布, 则 θ 的均值和方差可以写成 $E(\theta) = \frac{\theta_{\min} + \theta_{\max}}{2}$, $V(\theta) = \frac{(\theta_{\max} - \theta_{\min})^2}{2}$. Gamma 分布的均值和方差分别为

$$E'(\theta) = \frac{a}{b}, V'(\theta) = \frac{a}{b^2}, \text{ 则}$$

$$a = \frac{3(\theta_{\max} + \theta_{\min})^2}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})^2}$$

4 组, 分别建立发动机性能退化模型如式(1), 通过极大似然估计即式(2)得到 4 组退化模型的参数 μ 和 θ 的极大似然估计值 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\theta}$. 然后, 在此基础上, 按照 Monte Carlo 法模拟发动机性能退化数据, 并用 SPSS 软件对构造参数 k 进行标准正态分布检验, 其检验结果 P 值为 0.988, 表明发动机性能退化数据服从 Wiener 过程.

$$b = \frac{6(\theta_{\max} + \theta_{\min})}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})^2}$$

μ 的边缘分布可以写成

$$f(\mu | x) = \frac{b^a \sqrt{2a-1}}{\partial^{a+\frac{1}{2}} \sqrt{2\pi}} \frac{\Gamma(a + \frac{1}{2})}{\Gamma(a)}$$

其中 $\partial = b + \frac{1}{2}(2a-1)(\mu - c)^2$, 则 $c = \mu$. 将得到的 a, b, c 值代入式(3)得到 $f(\mu, \theta | x)$ 的先验分布.

从先验分布的计算过程来看, 先验分布反映了根据历史经验得到的相同型号发动机机队性能退化的规律. 对于单台发动机而言, 由于飞行环境、维修等多方面使用条件的不同, 单台发动机性能退化的规律与机队整体性能退化的规律不尽相

同. 随着单台发动机性能退化数据的积累,按照式(4)利用贝叶斯理论更新 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 的后验分布,再通过边缘密度计算如式(5)、式(6)得到更新的 μ 和 θ 的参数估计,从而按照式(7)和式(8)预测单台发动机的性能可靠性与剩余寿命分布.

图 1 给出了 41 号发动机性能可靠性的真实值与预测值的比较. 图中 R_1, R_2, R_3 分别代表发动机在 1500 飞行循环,2000 飞行循环和 3000 飞行循环时预测的性能可靠性曲线, R 表示发动机性能可靠性真实值的曲线. 从图中可以看出,在 1500 飞行循环时,41 号发动机性能可靠性的真实值与预测值的差距明显,这是由于此时 41 号发动机的性能可靠性模型参数是按照前 40 台发动机历史性能衰退数据计算的性能退化参数,反映出 41 号发动机个体与前 40 台发动机机队性能可靠性的差异性. 随着 41 号发动机性能可靠性数据的积累,通过文中所提方法逐步对 41 号发动机性能退化的参数进行更新,表 2 给出了 41 号发动机性能退化参数 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 的更新,可以看到图 1 中发动机在 3000 飞行循环时性能可靠性的预测值接近真实值.

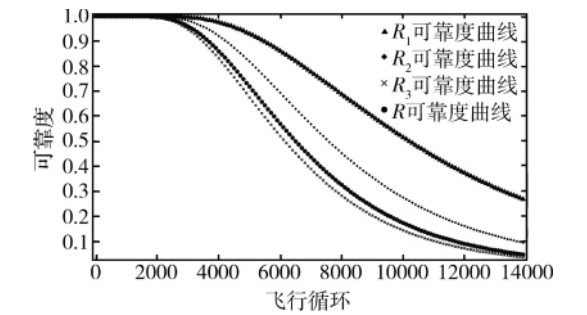


图 1 41 号发动机性能可靠性的真实值与预测值
Fig. 1 True and predictional data of performance reliability of No. 41 engine

表 2 41 号发动机性能退化参数的更新			
Table 2 Updating of performance degradation parameters of No. 41 engine			
参数	1500 循环	2000 循环	3000 循环
$\hat{\mu}$	0.00651	0.00892	0.01102
$\hat{\sigma}$	0.359982	0.388587	0.424983

任淑红等^[12]在文中根据相同型号发动机历史性能衰退数据得到机队的性能退化模型参数 μ 和 σ ,并将 μ 和 σ 固定,称为固定参数方法,以此用于对其他相同型号发动机的剩余寿命的预测.

图 2 给出了 41 号发动机剩余寿命概率密度函数的预测. f_1, f_2, f_3 分别表示发动机在 1500 飞行循环,2000 飞行循环和 3000 飞行循环时预测的剩余寿命的分布. 从图 2 中可以看出,随着飞行循环数的增加,剩余寿命逐渐减少,分布值相对集中.

表 3 给出了可靠性水平在 90% 条件下,文中所提方法与任淑红等^[12]所提方法(固定参数方法)对于剩余寿命预测的比较结果. 可以看出,随着 41 号发动机性能数据的累积,相比固定参数方法,本文提出的方法预测的剩余寿命精度逐步提高,相对误差逐步减少.

同时根据表 3,本文提出的方法在 41 号发动机 2000 循环和 3000 循环时预测的剩余寿命相对误差分别为 0.060 和 0.018,可以满足航空公司发动机下发计划制定的实际需要,便于发动机机队的灵活管理.

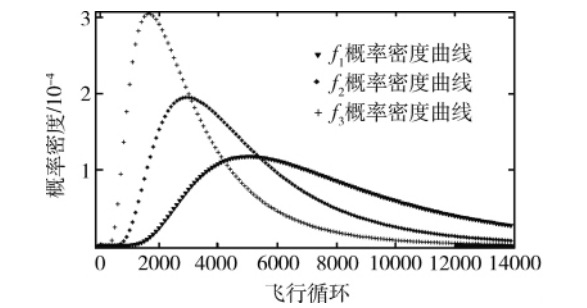


图 2 41 号发动机剩余寿命概率密度函数的预测
Fig. 2 Prediction of residual life probability density function of No. 41 engine

表 3 41 号发动机剩余寿命预测值的比较
Table 3 Comparison of residual life prediction of No. 41 engine

项 目	循环数		
	1500	2000	3000
文中所提方法预测值/次	5409	4213	3416
固定参数方法预测值/次	5607	4952	3764
文中所提方法预测相对误差	0.086	0.060	0.018
固定参数方法预测相对误差	0.126	0.105	0.082

4 结 论

本文给出了一种新的民用航空发动机性能可靠性与剩余寿命预测的方法,通过实例可以看出,本文所给出的预测方法随着发动机性能数据的更新,单台发动机性能可靠性与剩余寿命的预测值

更加准确,可以很好地满足航空公司预测下发的需要。

参考文献:

- [1] Cox D R, Miller H D. The theory of stochastic processes [M]. London: Chapman and Hall, 1965.
- [2] Doksum K A, Hoyland A. Models for variable-stress accelerated life testing experiments based on Wiener processes and the inverse Gaussian distribution[J]. Technometrics, 1992, 34(1): 74-82.
- [3] Whitmore G A. Estimating degradation by a Wiener diffusion process subject to measurement error[J]. Lifetime Data Analysis, 1995, 1(3): 307-319.
- [4] Whitmore G A, Schenkelberg F. Modeling accelerated degradation data using Wiener diffusion with a time scale transformation[J]. Lifetime Data Analysis, 1997, 3(1): 27-45.
- [5] Park C, Padgett W J. Accelerated degradation models for failure based on geometric Brownian motion and Gamma processes[J]. Lifetime Data Analysis, 2005, 11(4): 511-527.
- [6] Onar A, Padgett W J. Accelerated test models with the inverse Gaussian distribution[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2000, 89(1/2): 119-133.
- [7] 赵建印, 彭宝华, 孙权, 等. 金属化膜脉冲电容器退化失效分析[J]. 高电压技术, 2006(3): 62-64.
ZHAO Jianyin, PENG Baohua, SUN Quan, et al. Degradation failure analysis of metallized film pulse capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2006(3): 62-64. (in Chinese)
- [8] 厉海涛, 金光, 周经伦, 等. 动量轮 Wiener 过程退化建模与寿命预测[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3): 622-627.
LI Haitao, JIN Guang, ZHOU Jinglun, et al. Momentum wheel Wiener process degradation modeling and life prediction[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3): 622-627. (in Chinese)
- [9] 周经伦, 厉海涛, 刘学敏, 等. Wiener 过程寿命预测的一种自助法 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(8): 1588-1592.
ZHOU Jinglun, LI Haitao, LIU Xuemin, et al. A bootstrap method of life prediction based on Wiener process[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2011, 31(8): 1588-1592. (in Chinese)
- [10] 王小林, 郭波, 程志君, 等. 考虑有损伤测量条件下的设备剩余寿命的建模分析[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(5): 59-63.
WANG Xiaolin, GUO Bo, CHENG Zhijun, et al. Modeling and analysis of equipment's residual life considering the condition of damaging measuring[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(5): 59-63. (in Chinese)
- [11] 齐建军, 刘亚杰, 程志君. 基于 Wiener 过程的航天加注泵性能可靠性评估[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2011(1): 18-21.
QI Jianjun, LIU Yajie, CHENG Zhijun. Reliability analysis of charging pump for spaceflight based on Wiener process[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2011(1): 18-21. (in Chinese)
- [12] 任淑红, 左洪福, 白芳. 基于带漂移的布朗运动的民用航空发动机实时性能可靠性预测[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12): 2796-2801.
REN Shuhong, ZUO Hongfu, BAI Fang. Real-time performance reliability prediction for civil aviation engines based on Brownian motion with drift[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(12): 2796-2801. (in Chinese)
- [13] 任淑红. 民航发动机性能可靠性评估与在翼寿命预测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
REN Shuhong. Research on methods of performance reliability assessments and life on wing prediction for civil aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [14] Congdon P. Bayesian statistical modeling[M]. Hoboken, US: Wiley, 2001.
- [15] Ahmad K E, Jaheen Z F. Approximate Bayes estimators applied to the inverse gaussian lifetime model[J]. Computers Math Applic, 1995, 29(12): 39-47.
- [16] Chikkara R S, Folks J L. The inverse Gaussian distribution: theory, methodology and applications [M]. New York: Marcell Dekker, 1989.
- [17] Seshadri V. The inverse Gaussian distribution[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.