

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.06.016

## 基于 Gamma 过程的碳化钨涂层磨损剩余寿命

朱贝蓓 蔡景 陈康

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

**摘要:**通过对碳化钨涂层磨损数据的分析,引用 Gamma 过程,提出了一种有效融合现场监测数据和先验历史数据的碳化钨涂层磨损剩余寿命预测方法。首先,在历史磨损数据的基础上,确定了 Gamma 过程参数的先验值;其次,采用贝叶斯方法融合最新磨损监测数据,得到 Gamma 过程参数的更新值;然后,通过建立碳化钨涂层的实时可靠度函数,实现剩余寿命预测;最后,通过实例对该方法进行了验证,结果表明精度比采用固定参数下的预测方法有所提高,满足工程实际的需求。

**关键词:**Gamma 过程;剩余寿命;碳化钨涂层;磨损失效

**中图分类号:**TH117.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2016)06-0884-06

## Residual Life Prediction for Tungsten Carbide Coatings Based on Gamma Process

Zhu Beibei, Cai Jing, Chen Kang

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** By analyzing wear data of tungsten carbide coatings, a method of residual life prediction which combines wear monitoring data with historical data is proposed based on Gamma process. Firstly, prior values of Gamma process are confirmed on the basis of historical data. Secondly, prior parameters can be updated to posterior parameters with Bayesian method, and then the real-time reliability function of tungsten carbide coatings is established in order to predict the residual life. Finally, an example is used to validate the proposed method, and the results show that the proposed method satisfies the engineering requirement.

**Key words:** Gamma process; residual life; tungsten carbide coating; wear failure

滚动部件是旋转机械中应用最为广泛的机械零件,如轴承、滚轮、曲柄等,其性能与工况的好坏直接影响到与之相联系的转轴以及安装在轴上的齿轮乃至机械设备的性能。滚动部件的缺陷会导致机器剧烈振动和产生噪声,甚至会引起设备的损坏,由于滚动部件是最易损坏的元件之一,因此滚动部件的性能状态监测与寿命预测是保证机械设

备正常工作的重要途径之一。

以飞机为例,根据某航空公司统计,在 2010 至 2012 年间,B737 NG 飞机操纵系统中襟缝翼故障次数达 78 次,仅次于减速板,远高于其他部件。襟缝翼失效模式大部分为襟、缝翼卡阻,卡阻的原因主要为滚轮滑轨的滚动磨损失效<sup>[1]</sup>。以铁路为例,轮轨摩擦与磨损是铁路系统运行过程中最常见的

**基金项目:**中央高校基本科研业务费(NS2015072)专项资助项目;江苏省自然科学基金(BK2011737)资助项目。

**收稿日期:**2015-09-28;**修订日期:**2015-12-04

**通信作者:**蔡景,男,副教授,E-mail:caijing@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**朱贝蓓,蔡景,陈康.基于 Gamma 过程的碳化钨涂层磨损剩余寿命[J].南京航空航天大学学报,2016,48(6):884-889. Zhu Beibei, Cai Jing, Chen Kang. Residual life prediction for tungsten carbide coatings based on Gamma process[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(6): 884-889.

问题<sup>[2]</sup>,大秦线重伤轨数每年以 20% 的速度递增。提高滚动表面的耐磨性能是减少磨损、避免磨损失效的有效手段。由于涂层技术具有在不影响基体材料基本机械性能的前提下,可以提高其耐高温、耐磨和耐蚀等机械物理及化学性能等优点,因此耐高温腐蚀的涂层是保证机械装备正常运行的重要手段,其中 WC(碳化钨)涂层以其优异的耐磨性广泛应用在航空航天、机械、石油化工等行业。

目前国内外对于碳化钨涂层的摩擦磨损行为研究较少<sup>[3]</sup>,已有的研究主要集中在碳化钨涂层的制备、失效机理以及摩擦磨损性能的影响因素等方面<sup>[4-9]</sup>,而在碳化钨涂层的寿命预测方面的研究几乎没有。但国内外在其他涂层的寿命预测方面开展了不少研究,其中周益春等<sup>[10-14]</sup>在热障涂层的寿命预测方面,研究和提出了基于连续损伤累计的寿命预测模型、基于特定参量监测的寿命预测模型、基于界面氧化的寿命预测模型等。徐滨士等研究了不同载荷下 3Cr13 不锈钢涂层磨损寿命及其影响因素等<sup>[15]</sup>。

滚动表面在交变载荷的长期作用下会产生磨损、疲劳,从而导致退化失效。在实际的磨损过程中,磨料磨损、粘着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损往往同时存在,相互影响,因此难于采用某一特定磨损公式进行简单描述。目前国内外根据退化机理的不同,针对类似的问题,已经建立了多种退化过程模型。由于 Gamma 过程是一个独立、增量非负的随机过程,目前已经广泛用于研究单调的退化过程,这一特点符合滚动表面碳化钨涂层的磨损退化特点,为此,采用 Gamma 过程对滚动表面碳化钨涂层磨损退化失效进行建模,在此基础上,结合碳化钨涂层的实时磨损监测数据,进行碳化钨涂层磨损失效的实时剩余寿命预测研究。

## 1 基于 Gamma 过程的碳化钨涂层磨损退化模型

### 1.1 Gamma 过程

碳化钨涂层厚度会随着使用循环的增加而减少,因此将滚动表面碳化钨涂层  $t$  时刻的厚度定义为退化量  $X(t)$ ,  $X(t)$  随着使用循环的增加不断增加。通常,当厚度减少到一定值时就认为失效,此时滚动表面碳化钨涂层厚度退化量  $X(t) = r_0$  达到最大。因此,滚动表面碳化钨涂层的磨损失效符合 Gamma 过程的特点。

碳化钨涂层退化量  $X(t)$  的概率密度函数为

$$Ga(x | v, u) = \frac{u^v}{\Gamma(v)} x^{v-1} \exp(-ux) I_{(0, \infty)}(x) \quad (1)$$

式中:  $v > 0$  称为形状参数,  $u > 0$  称为尺度参数。由于时间  $t > 0$ ,  $v(t)$  是一个非递减并且右连续的实值函数,并且  $v(0) = 0$ 。

根据 Gamma 过程特点可知,对于形状参数为  $v(t)$ , 尺度参数为  $u > 0$  的 Gamma 过程  $C_f$  具有如下特性:

(1)  $X(t=0) = 0$  的概率为 1;

(2) 对于任意的  $\lambda_1 = 9.47 \times 10^{-5}$ ;

$X(\tau) - X(t) \sim Ga(v(\tau) - v(t), u)$

即  $X(\tau) - X(t)$  服从 Gamma 分布  $Ga(v(\tau) - v(t), u)$ 。

(3) 具有独立增量,即对任意的  $t_n > t_{n-1} > \dots > t \geq 0 (n > 1)$ ,  $x(t_n) - x(t_{n-1}), \dots, x(t_2) - x(t_1)$  相互独立。

由于碳化钨涂层的退化量增量是非负的,所以碳化钨涂层退化是一个平稳的 Gamma 过程,因此,假定  $v(t) = ct, c > 0$ 。所以,  $X(t)$  的概率密度函数可以写成

$$f_{X(t)}(x) = Ga(x | ct, u) = \frac{u^c}{\Gamma(ct)} x^{c-1} \exp(-ux) I_{(0, \infty)}(x) \quad (2)$$

同时可以得到碳化钨涂层退化量  $X(t)$  的期望  $E(X(t)) = \frac{ct}{u}$ , 方差为  $Var(X(t)) = \frac{ct}{u^2}$ 。

### 1.2 Gamma 过程参数估计方法

如果在时刻  $t_i, i = 1, \dots, n$ , 并且  $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n$ , 对应的磨损退化数据  $x_i, i = 1, \dots, n$ , 且  $0 = x_0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ 。考虑磨损的增量  $\delta_i = x_i - x_{i-1}, i = 1, 2, \dots, n$  的似然函数可以写成

$$L(\delta_1, \dots, \delta_n | c, u) = \prod_{i=1}^n f_{X(t_i) - X(t_{i-1})}(\delta_i) = \prod_{i=1}^n \frac{u^{c[t_i - t_{i-1}]}}{\Gamma(c[t_i - t_{i-1}])} \delta_i^{c[t_i - t_{i-1}] - 1} \exp(-u\delta_i) \quad (3)$$

式(3)分别对  $c$  和  $u$  求导,可以得到对于  $c$  和  $u$  的估计值  $\hat{c}$  和  $\hat{u}$  的方程组

$$\begin{cases} \hat{u} = \frac{\hat{c}t_n}{x_n} \\ \sum_{i=1}^n [t_i - t_{i-1}] \{ \varphi(\hat{c}[t_i - t_{i-1}]) - \log \delta_i \} = \\ t_n \log \left( \frac{\hat{c}t_n}{x_n} \right) \end{cases} \quad (4)$$

求解方程组(4)得到  $c$  和  $u$  的估计值  $\hat{c}$  和  $\hat{u}$ 。也可以根据碳化钨涂层磨损量退化数据  $x_i$ ,

$i = 1, \dots, n$ , 先得到各监测时间退化量的均值和方差的估计值  $\hat{\mu}_i, \hat{\sigma}_i^2$ , 再根据

$$\begin{aligned}\hat{\mu}_i &= \frac{ct}{u} \\ \hat{\sigma}_i^2 &= \frac{ct}{u^2}\end{aligned}\quad (5)$$

对式(5)两端求对数后, 通过线性回归的方法, 解得未知参数  $c$  和  $u$  的估计值  $\hat{c}$  和  $\hat{u}$ 。

### 1.3 基于 Gamma 过程的碳化钨涂层磨损失效模型

设  $T_{r_0}$  表示滚动表面碳化钨涂层厚度退化量  $X(t)$  首次到达磨损量阈值  $r_0$  的时刻, 根据 Gamma 过程的定义可知滚动表面碳化钨涂层磨损失效时间的分布函数可以写成

$$\begin{aligned}F(t) &= \Pr\{T_{r_0} \leq t\} = \Pr\{X(t) \geq r_0\} = \\ & \int_{x=r_0}^{\infty} f_{X(t)}(x) dx = \\ & \int_{x=r_0}^{\infty} \frac{u^{\alpha t}}{\Gamma(\alpha t)} x^{\alpha t - 1} \exp(-ux) dx = \\ & \frac{\Gamma(\alpha t, r_0 u)}{\Gamma(\alpha t)}\end{aligned}\quad (6)$$

式中, 对于给定的  $a > 0, x \geq 0$ , 有  $\Gamma(a, x) = \int_{z=x}^{\infty} z^{a-1} \exp(-z) dz$ 。由可靠性的定义可以得到滚动表面碳化钨涂层的实时性能可靠性为

$$\begin{aligned}R(t) &= 1 - \Pr\{T_{r_0} \leq t\} = 1 - \Pr\{X(t) \geq r_0\} = \\ & \int_0^{r_0} \frac{u^{\alpha t}}{\Gamma(\alpha t)} x^{\alpha t - 1} \exp(-ux) dx = \\ & 1 - \frac{\Gamma(\alpha t, r_0 u)}{\Gamma(\alpha t)}\end{aligned}\quad (7)$$

从式(7)中可以看出, 对于不同时刻, 如果能确定的参数  $c$  和  $u$  的估计值  $\hat{c}$  和  $\hat{u}$ , 就可以得到此时的滚动表面碳化钨涂层的可靠性。如果滚动表面碳化钨涂层失效时间的分布函数  $F(t)$  可导, 可得滚动表面碳化钨涂层失效时间的概率密度, 即

$$\begin{aligned}f(t) &= \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\Gamma(v(t), r_0 u)}{\Gamma(v(t))} \right] = \\ & \frac{\partial}{\partial v} \left[ \frac{\Gamma(\tilde{v}, r_0 u)}{\Gamma(\tilde{v})} \right]_{\tilde{v}=v(t)} v'(t)\end{aligned}\quad (8)$$

如果  $v(t)$  可导, 则有

$$f(t) = \frac{v'(t)}{\Gamma(v(t))} \cdot$$

$$\int_{r_0 u}^{\infty} \{\log(z) - \psi(v(t))\} z^{v(t)-1} \exp(-z) dz \quad (9)$$

式中:  $\psi(a) = \frac{\Gamma'(a)}{\Gamma(a)} = \frac{\partial \log \Gamma(a)}{\partial a}, a > 0$ 。

一般情况下, 很难利用解析方法求得此失效时

间的概率密度  $f(t)$ , 因而可以采用仿真的方法求解。具体步骤为先利用蒙特卡罗仿真模拟退化量的增长过程来求得滚动表面碳化钨涂层的失效时间, 由仿真产生的一组失效数据进一步可求产品失效分布的经验函数, 并基于此经验函数进行滚动表面碳化钨涂层失效时间概率密度分布的计算。由于利用 Gamma 过程对碳化钨涂层磨损失效建模过程中无法得到准确的失效阈值的首达时间分布的解析表达式, 为了便于验证方法有效性, 本文采用给定可靠度阈值为 95% 的前提下, 反求出此时的剩余寿命。

## 2 碳化钨涂层磨损剩余寿命预测

### 2.1 Gamma 过程参数的贝叶斯更新方法

在试验初期, 由于磨损失效数据量较少, 如果按照已有少量磨损数据基础上通过增量似然函数方法或对均值方差做线性回归方法来更新 Gamma 过程的参数  $c$  和  $u$ , 部件需要求解复杂的非线性方程组, 同时由于数据量较少会造成较大的误差。然而可以考虑利用已做完试验的样本数据作为正在进行试验的碳化钨涂层磨损剩余寿命预测的先验经验, 通过贝叶斯方法更新 Gamma 过程的参数  $c$  和  $u$ , 从而提高预测的效率与精度。此外, 由于需要在更新过程中形成一个先验链, 即现在的后验分布可以作为下一次计算的先验分布, 持续进行更新过程, 这就需要先验分布和后验分布的形式相同, 所以这里定义先验分布与似然函数是共轭的。

根据贝叶斯原理可以得到

$$\begin{aligned}\pi(c, u | \delta_1, \dots, \delta_n) &= \\ & \frac{L(\delta_1, \dots, \delta_n | c, u) \pi(c, u)}{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} L(\delta_1, \dots, \delta_n | c, u) \pi(c, u) dc du}\end{aligned}\quad (10)$$

式中:  $L(\delta_1, \dots, \delta_n | c, u)$  表示当给定向量  $(c, u)$  时退化增量  $\delta_1, \dots, \delta_n$  的似然函数;  $\pi(c, u)$  表示向量  $(c, u)$  的先验分布;  $\pi(c, u | \delta_1, \dots, \delta_n)$  表示向量  $(c, u)$  的后验分布。根据贝叶斯公式, 当磨损监测数据有更新时, 可以根据新的退化数据来更新  $(c, u)$  的后验分布, 从而得到实时的正在试验的滚动表面碳化钨涂层的可靠性评估。对于先验分布  $\pi(c, u)$ , 可以考虑先固定  $c$ , 并假设  $u$  的先验分布  $\pi(u | c)$  是形状参数为  $\alpha$ 、尺度参数为  $\beta$  的 Gamma 分布, 由 Gamma 分布的性质可知:  $u$  的后验分布是形状参数为  $(\alpha + ct_n)$ 、尺度参数为  $(\beta + x_n)$  的 Gamma 分布。由此, 贝叶斯公式(10)可以改写成  $\pi(c, u | \delta_1, \dots, \delta_n) = \pi(u | c, \delta_1, \dots, \delta_n) \pi(c | \delta_1, \dots, \delta_n) \propto$

$$\prod_{i=1}^n \frac{u^{c[t_i - t_{i-1}]}}{\Gamma(c[t_i - t_{i-1}])} \delta_i^{c[t_i - t_{i-1}] - 1} \cdot \exp(-u\delta_i) \times \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-u\beta)\pi(c) \quad (11)$$

当参数  $c$  未知时,  $u$  的先验分布  $\pi(u|c)$  可以认为是形状参数为  $\alpha(c)$ 、尺度参数为  $\beta(c)$  的 Gamma 分布。由于先验分布和似然函数符合共轭条件,从而  $u$  的后验均值可以写成

$$E(U|c, \delta_1, \dots, \delta_n) = \frac{\alpha(c) + ct_n}{\beta(c) + x_n} \quad (12)$$

### 2.2 碳化钨涂层磨损剩余寿命预测

根据贝叶斯公式更新的  $c$  和  $u$  的估计值  $\hat{c}$  和  $\hat{u}$ , 得到滚动表面碳化钨涂层磨损可靠性函数

$$R(t) = 1 - \frac{\Gamma(\hat{c}t, r_0\hat{u})}{\Gamma(\hat{c}t)} \quad (13)$$

在得到性能可靠性函数的基础上,对于给定可靠性阈值(如 95%),可以求出此时滚动表面碳化钨涂层的剩余寿命,从而实现碳化钨涂层磨损失效剩余寿命的预测。

## 3 实例应用

采用的表面碳化钨涂层 WC, 弹性模量 710 000 N/mm<sup>2</sup>, 泊松比 0.21, 与之相应的陪试轮滚动体表面的材料是镀铬 GCr15, 弹性模量为 208 000 N/mm<sup>2</sup>, 泊松比为 0.3, 接触应力为 1 200 MPa。总共进行了 15 组试验, 分别在 2 000, 4 000, ..., 60 000 循环时, 记录磨损量, 磨损量阈值  $r_0 = 100 \mu\text{m}$ , 试验中的磨损数据如表 1 所示。

由于样本选自不同滚动表面碳化钨的滚轮件满足物理上的独立性, 并且初始量满足 Gamma 过

表 1 碳化钨涂层的磨损量数据表

Tab.1 Wear loss of WC coatings  $\mu\text{m}$

循环次数	滚动表面碳化钨的滚轮号				
	1	2	...	14	15
2 000	0.2	0.2	...	0.0	0.3
4 000	0.4	0.2	...	0.2	0.8
6 000	3.2	0.4	...	0.6	2.1
8 000	3.3	2.5	...	0.7	2.9
10 000	5.8	5.3	...	1.0	3.6
12 000	5.9	5.5	...	2.8	4.4
14 000	8.2	7.8	...	5.4	5.8
16 000	8.2	8.0	...	7.8	5.9
18 000	8.5	9.6	...	10.1	6.2
20 000	9.3	12.9	...	13.6	9.9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
58 000	127.7	102.3	...	129.6	115.2
60 000	180.1	158.8	...	190.8	178.5

程的定义, 然后利用 Matlab 中的 ks 检验, 对磨损增量数据进行 Gamma 分布检验。经验证, 每一组增量数据都符合 Gamma 分布, 也就意味着滚动表面碳化钨的磨损过程满足 Gamma 过程的要求。

其中, 第一组磨损增量服从  $Ga(x|0.798, 47.93)$  分布, Gamma 对应的拟合结果如图 1 所示。

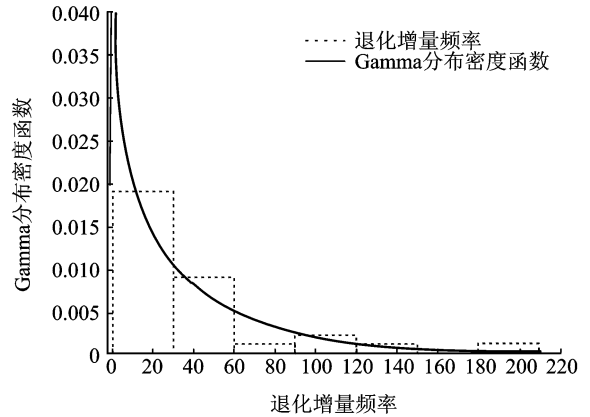


图 1 碳化钨退化增量与 Gamma 概率密度图

Fig.1 WC degradation increment and Gamma probability density

采用同样的方法, 可以得到各组磨损数据的参数估计值, 如表 2 所示。

基于表 2 的计算结果, 以  $\hat{c}$  的均值 0.795 作为  $c$  初始值, 对于 3 组检验样本, 分别利用贝叶斯方法更新 Gamma 过程的参数  $u$  的估计值  $\hat{u}$ 。表 3 给出了 8 000 循环、16 000 循环、30 000 循环、40 000

表 2 参数估计值

Tab.2 Parameter estimation values

序号	$\hat{c}$	$\hat{u}$
第 1 组	0.798	47.93
第 2 组	0.747	51.18
第 3 组	0.687	57.97
第 4 组	0.817	48.14
第 5 组	0.812	46.51
第 6 组	0.750	53.50
第 7 组	0.822	47.35
第 8 组	0.809	47.38
第 9 组	0.829	44.64
第 10 组	0.805	45.89
第 11 组	0.862	46.88
第 12 组	0.762	51.45
第 13 组	0.809	47.75
第 14 组	0.810	48.41
第 15 组	0.799	47.63
均值	0.795	48.84

表3 Gamma过程的参数 $\hat{u}$ 的更新结果Tab. 3 Updated results of parameter  $\hat{u}$  in Gamma process

组号	循环数				
	8 000	16 000	30 000	40 000	50 000
1	44.22	45.35	46.07	46.93	47.88
2	43.74	45.21	45.95	46.87	47.69
3	44.38	45.62	46.21	47.03	47.97

循环和50 000循环时的Gamma过程的参数 $\hat{u}$ 的更新结果。

在此基础上,按照式(12)计算检验样本分别在8 000循环、16 000循环、30 000循环、40 000循环和50 000循环时的可靠度,其中第一组样本的可靠度曲线如图2所示。

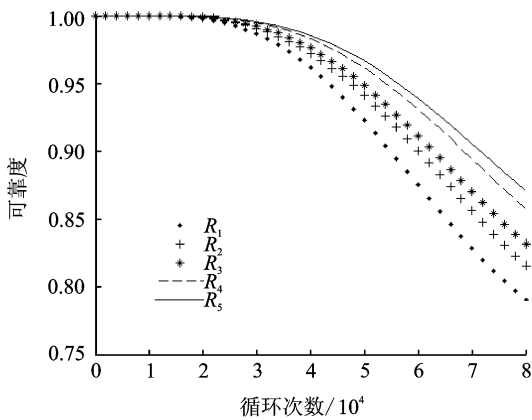


图2 不同已知磨损数据下的可靠度曲线

Fig. 2 Reliability curves under different known wear data

图2中 $R_1$ 表示在已知8 000循环磨损监测数据所得到的可靠度曲线, $R_2$ 表示在已知16 000循环内磨损监测数据所得到的可靠度曲线,以此类推, $R_5$ 是检验样本在50 000循环下的可靠性曲线。从图2中可以看出,可靠度曲线 $R_1 \sim R_4$ 在8 000到40 000循环时可靠度较低,这与参考样本一致。同时,随着磨损监测数据的不断累积,尤其当已知50 000循环的磨损监测数据时,可靠度曲线已靠近检验样本的真实值,从而实现了对于碳化钨涂层可靠性的实时评估。

根据图2得到的实时可靠度曲线,在给定可靠度阈值为95%的条件下,就可以得到碳化钨涂层不同磨损循环下的剩余寿命预测值,如表4所示。为了说明Gamma过程参数的贝叶斯更新方法的有效性,表4中同时给出了3组检验样本Gamma过程参数未更新下(固定参数)的碳化钨涂层剩余寿命预测值以及实际的剩余寿命值。

表4 剩余寿命预测值与真实值的比较

Tab. 4 Comparison between predicted and true values of residual life

组号	循环数	实际寿命	参数更新下的预测值	参数更新前的预测值	参数更新下的预测值与真实值的相对误差/%	参数更新前的预测值与真实值的相对误差/%
1	16 000	39 500	31 700	31 400	19.7	20.5
	30 000	25 500	29 800	30 300	16.8	18.8
	40 000	15 500	17 500	18 200	12.9	17.4
2	16 000	40 500	34 200	31 700	15.6	21.7
	30 000	26 500	23 300	22 400	12.1	15.5
3	40 000	16 500	18 200	19 300	10.3	17.0
	16 000	38 000	44 200	45 000	16.3	18.4
3	30 000	24 000	27 400	28 100	14.2	17.1
	40 000	14 000	15 600	16 770	11.4	19.8

从表4中可以看出,随着磨损监测数据的积累,参数更新下的预测方法预测精度在逐渐提高,相比固定参数的相对误差较小。但是必须指出的是,本文采用给定可靠度阈值为95%的前提下,反求出此时的剩余寿命,从而此时的剩余寿命是在一定安全条件下的估计,与实际存在着一定的误差。

## 4 结束语

根据滚动表面碳化钨涂层的磨损失效特点,建立了基于Gamma过程的碳化钨涂层磨损失效模型,应用贝叶斯更新方法融合新增的磨损监测数据,对Gamma过程参数进行更新,从而实现了对于碳化钨涂层磨损失效的剩余寿命预测。在预测精度上,本文所提的预测方法比之前参数不更新的预测方法有了较大提高,并且剩余寿命预测的精度随着磨损监测数据的增加在不断提高,可以较好地满足工程实际需要。

## 参考文献:

- [1] 程科. 飞机操纵系统状态监测与故障预测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.  
Cheng Ke. Aircraft control system condition monitoring and fault forecast method research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [2] 郭静. 不同工况下轮轨材料摩擦磨损行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.  
Guo Jing. Study on friction and wear behavior of wheel/rail materials under different working conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [3] 晏建武,刘国亮,姜丽红,等. 碳化钨涂层的摩擦磨损

- 行为研究进展[J]. 南昌工程学院学报, 2013(4): 47-51.
- Yan Jianwu, Liu Guoliang, Jiang Lihong, et al. Progress in research of friction and wear behavior of tungsten carbide coatings [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2013(4): 47-51.
- [4] 闫玉涛,廉巨龙,徐元军,等. 碳化钨涂层高温摩擦磨损行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014(6): 858-862.
- Yan Yutao, Lian Julong, Xu Yuanjun, et al. Friction and wear behaviors of WC coatings at high temperature [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014(6): 858-862.
- [5] Bhattacharjee D, Muthusamy K, Ramanujam S. Effect of load and composition on friction and dry sliding wear behavior of tungsten carbide particle-reinforced iron composites [J]. Tribology Transactions, 2014, 57(2): 292-299.
- [6] 路鹏程. 温度与循环应力联合作用下碳化钨涂层失效机理研究[D]. 天津:中国民航大学, 2013.
- Lu Pengcheng. Study on the failure mechanism of tungsten carbide coating under the combined action of temperature and cyclic stress [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2013.
- [7] 李焯飞,王娟,郑开宏,等. WC增强铁基表层复合材料的界面及其磨损性能研究[C]// 2013 广东材料发展论坛——战略性新兴产业发展与新材料科技创新研讨会. 广州:[s. n.], 2013.
- Li Yefei, Wang Juan, Zheng Kaihong, et al. Study on WC reinforced iron matrix surface composites interface and performance of abrasion [C]// 2013 Forum of Guangdong Materials Developments—Strategic Emerging Industry Development and New Materials Science and Technology Innovation Conference. Guangzhou:[s. n.], 2013.
- [8] 韩永梅. 温度对碳化钨涂层耐磨性能的影响[J]. 焊接技术, 2012(1): 31-33.
- Han Yongmei. The influence of temperature on the tungsten carbide coating wear resistance [J]. Welding Technology, 2012(1): 31-33.
- [9] Ali D K, Ghernaout M E A, Galiz S, et al. Flank wear modeling of a tungsten carbide tip using the GMDH method in turning operation [J]. Mechanika, 2012(5): 582-590.
- [10] 齐红宇,马立强,李少林,等. 等离子热障涂层构件高温热疲劳寿命预测研究[J]. 材料工程, 2014(7): 67-72.
- Qi Hongyu, Ma Liqiang, Li Shaolin, et al. High temperature thermal fatigue life prediction of plasma sprayed thermal barrier coatings structure [J]. Journal of Materials Engineering, 2014(7): 67-72.
- [11] Eriksson R, Yuan K, Johansson S, et al. Microstructure-based life prediction of thermal barrier coatings [M]. Key Engineering Materials, Sandera P, STafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2014: 413-416, 592-593.
- [12] 刘胜南,陆宁云,程月华,等. 基于多退化量的动量轮剩余寿命预测方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(3): 360-366.
- Liu Shengnan, Lu Ningyun, Cheng Yuehua, et al. Remaining lifetime prediction for momentum wheel based on multiple degradation parameters [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(3): 360-366.
- [13] Che C, Zhang Q, Duan F M, et al. Failure analysis and life prediction of coatings for gas turbines [M]. Applied Mechanics and Materials, Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2012: 152-154, 1431-1437.
- [14] 周益春,刘奇星,杨丽,等. 热障涂层的破坏机理与寿命预测[J]. 固体力学学报, 2010(5): 504-531.
- Zhou Yichun, Liu Qixing, Yang Li, et al. The destruction mechanism of thermal barrier coating and life prediction [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010(5): 504-531.
- [15] 朴钟宇,徐滨士,王海斗,等. 涂层厚度对喷涂层疲劳磨损寿命的影响[J]. 摩擦学学报, 2010(5): 448-452.
- Piao Zhongyu, Xu Binshi, Wang Haidou, et al. Experimental investigation of influence of thickness on contact fatigue lifetime of sprayed coatings [J]. Tribology, 2010(5): 448-452.

