

# 基于性能退化的失效阈值变化速率对产品可靠性的影响

王新刚<sup>1</sup>, 马瑞敏<sup>1</sup>, 黄小凯<sup>2</sup>, 常苗鑫<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械动力学与可靠性研究中心, 秦皇岛 066004; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 性能退化分析是一种有效弥补数据不足的可靠性评估方法。采用线性变化过程描述机械产品的性能退化过程, 考虑产品受极值冲击和运行冲击的情况, 分析性能退化过程对突发失效的阈值影响。基于变失效阈值的性能退化过程和变失效阈值的冲击过程, 建立突发失效和性能退化失效同时存在下的竞争失效可靠性模型。结合实例对可靠性模型进行分析, 结果表明:若采用定失效阈值, 忽略失效阈值的变化, 产品的可靠度会被高估; 在一定范围内, 机械产品的可靠度随着失效阈值变化速率的增大而下降, 随着性能退化量的变大而提升。

**关键词:** 变失效阈值; 性能退化; 可靠性; 竞争失效

中图分类号: TB114.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2020)02-0137-06

DOI: [10.12126/see.2020.02.006](https://doi.org/10.12126/see.2020.02.006)

## Effect of failure threshold change rate on the analysis of product reliability based on performance degradation

WANG Xin'gang<sup>1</sup>, MA Ruimin<sup>1</sup>, HUANG Xiaokai<sup>2</sup>, CHANG Miaoxin<sup>1</sup>

(1. Research Center of Mechanical Kinetics and Reliability, Northeastern University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Beijing Institute of Satellite Environmental Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The performance degradation analysis is an effective way of assessing the reliability when there are not enough failure data available. The performance degradation process of mechanical systems is described as a linear degradation process. With consideration of the extreme impact and the operation impact on the products, the threshold effect of the performance degradation process on the sudden failure is analyzed. Based on the analysis of the performance degradation process and the impact process of variable failure thresholds, a competitive failure reliability model is established with consideration of both the sudden failure and the performance degradation failure. The reliability model is analyzed with an example. It is shown that the reliability of the product would be overestimated if the failure threshold is regarded as a definite value. In a certain range, the reliability of the mechanical products gradually decreases with the increase of the change rate of the failure threshold, and keeps a positive correlation with the performance degradation.

**Keywords:** variable failure threshold; performance degradation; reliability; competitive failure

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 51475086); 中央高校基本科研业务项目(编号: N162312001); 北京卫星环境工程研究所创新基金项目(编号: CAST-BISEE 2019-019)

引用格式: 王新刚, 马瑞敏, 黄小凯, 等. 基于性能退化的失效阈值变化速率对产品可靠性的影响[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(2): 137-142

WANG X G, MA R M, HUANG X K, et al. Effect of failure threshold change rate on the analysis of product reliability based on performance degradation[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(2): 137-142

## 0 引言

科学技术的进步和生产技术的发展使产品的可靠性不断提高,在允许的的时间内,很难获得产品性能研究所需的失效数据<sup>[1]</sup>。性能退化分析作为一种有效弥补机械产品失效数据不足的方法,可以间接预测产品的寿命<sup>[2]</sup>。

基于机械产品性能退化的可靠度分析,关键在于产品退化模型的建立以及失效标准即失效阈值的确定。通常采用退化轨迹和随机冲击过程这2种方法来描述机械产品的性能退化过程。退化轨迹模型是指采用一些应用较为成熟的数学模型来拟合产品性能退化量和时间的关系<sup>[3-4]</sup>。一般情况下产品的失效往往是由多种失效模式导致的,当突发失效或性能退化失效之一达到其失效阈值都会导致产品的失效<sup>[5]</sup>。Li等<sup>[6]</sup>分析了产品同时包含随机冲击过程与性能退化过程且两者相互独立下的可靠性。Wang等<sup>[7]</sup>考虑了外部冲击载荷对退化过程的影响,并在模糊退化数据下进行了退化分析,建立了基于模糊退化数据的可靠性模型。刘晓娟等<sup>[8]</sup>在外部冲击过程和内部性能退化过程同时存在的情况下,采用时变copula函数建立多个退化过程和冲击过程下的竞争失效可靠性模型,研究表明产品在工作过程中,其自身的性能退化过程和所受到的外部冲击过程相互影响。An等<sup>[9]</sup>分析了冲击载荷引起的性能退化增量与冲击载荷大小之间的关系,研究表明系统有抵抗微小载荷的能力,只有超过一定范围的冲击载荷才会对系统的性能退化量产生影响。Rafiee等<sup>[10]</sup>在假定性能退化过程为线性的前提下,研究了外界冲击分别为极值冲击和运行冲击等情况下对线性退化速率的影响。黄文平等<sup>[11]</sup>认为突发失效的失效阈值是变化的,在极值冲击过程和线性退化过程同时存在以及突发失效的阈值受到性能退化过程影响的前提下,建立了微引擎在变失效阈值下的竞争失效可靠度模型。

在上述分析的基础上,考虑到产品本身的复杂性和工作环境的不稳定性,失效阈值为固定值不符合实际情况。随着性能退化量的逐渐增大,产品抵抗外载荷冲击的能力会逐渐减弱,即突发失效的失效阈值为随时间推移而降低的变量。温度等因素也会对材料的物理性能产生影响,因此性能退化过程

的失效阈值亦为随时间推移而降低的变量。本文提出了在冲击载荷分别为极值冲击和运行冲击时,多个失效模式下的时变失效阈值可靠度模型,分析了性能退化模型和突发失效模型,建立了极值冲击和运行冲击下产品的可靠度模型,最后结合实例对所提出的模型进行了验证。

## 1 性能退化失效模型

如图1所示,失效阈值随着时间推移逐渐降低,在工作应力的作用下,机械产品的性能退化量会随着工作的进行逐渐增加,在机械产品遭受外界冲击的时候( $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 分别表示外界冲击载荷作用的时刻),如果外界冲击不能使得产品立即失效,就会造成产品性能退化量突然增加<sup>[12]</sup>。外界随机冲击载荷造成的产品性能退化量的突然增加和产品自身的性能退化量之和构成了产品总的性能退化量<sup>[13]</sup>。当总的性能退化量超过失效阈值 $H$ 的时候,产品便会退化失效。

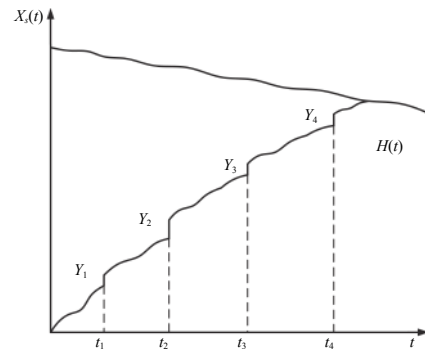


图1 性能退化失效过程

Fig. 1 Failure process of performance degradation

为了研究方便,令产品的失效阈值变化过程和性能退化过程都服从线性轨迹模型:

$$X(t) = \phi + \beta_1 t, \quad \beta_1 \sim N(\mu_{\beta_1}, \delta_{\beta_1}); \quad (1)$$

$$H(t) = H_0 - \beta_0 t, \quad \beta_0 \sim N(\mu_{\beta_0}, \delta_{\beta_0}). \quad (2)$$

式中: $X(t)$ 为 $t$ 时刻产品自身的性能退化量; $\phi$ 为产品的性能退化量在0时刻的数值; $\beta_1$ 为产品的性能退化速率,并且服从正态分布; $H(t)$ 为 $t$ 时刻产品的失效阈值; $H_0$ 为0时刻产品的失效阈值; $\beta_0$ 为失效阈值的变化速率,且服从正态分布。

假设产品所受的冲击载荷发生概率服从参数为 $\lambda$ 的齐次泊松分布。令 $Y_i$ 表示在时间 $t$ 内第 $i$ 次冲击导致的性能退化量,其中 $Y_i$ 相互独立并且服从同一分布函数,即 $Y_i \sim N(\mu_Y, \delta_Y^2)$ 。则,产品在时间 $t$ 内

由外界载荷导致的性能退化增量为

$$S(t) = \begin{cases} 0, & N(t) = 0 \\ \sum_{i=1}^{N(t)} Y_i, & N(t) > 0 \end{cases}, \quad (3)$$

总的性能退化量为

$$X_S(t) = X(t) + S(t); \quad (4)$$

产品在时间  $t$  内不发生失效的概率为

$$F_X(x, t) = \sum_{i=0}^{\infty} P(X(t) + S(t) < H(t) | N(t) = i) P(N(t) = i) = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi \left( \frac{H - \mu_{\beta_0} t - (\mu_{\beta_1} t + \varphi + i\mu_Y)}{\sqrt{\delta_{\beta_0}^2 t^2 + \delta_{\beta_1}^2 t^2 + i\delta_Y^2}} \right) \frac{\exp(-\lambda t)(\lambda t)^i}{i!}. \quad (5)$$

### 2 突发失效模型

如图 2 所示, 用  $w_i$  表示外界冲击载荷的幅值,  $D(t)$  表示突发失效阈值, 外界冲击载荷的幅值服从正态分布, 发生率服从泊松分布。

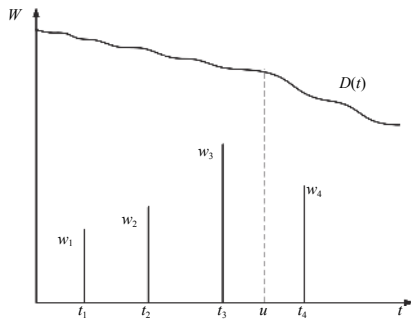


图 2 突发失效过程  
Fig. 2 Suddenly-occurred failure process

产品的性能退化过程会影响突发失效阈值的变化过程: 随着性能退化量的不断增加, 产品抵抗外界冲击载荷的能力减弱, 即产品的突发失效阈值逐渐降低, 当外界冲击载荷超过失效阈值时, 产品发生突发失效。突发失效阈值的变化情况同样适用于其他模型。为了研究方便, 假设突发失效的阈值变化服从二阶段的线性变化过程, 即在产品性能退化量小于  $L$  时以  $\beta_2$  的速率递减, 在产品性能退化量大于  $L$  时以  $\beta_3$  的速率递减,  $\beta_2$  与  $\beta_3$  均为服从正态分布函数的变量。

在时间  $t$  内, 突发失效的阈值变化情况如图 2 所示。设在  $u$  时刻性能退化量正好到达  $L$ , 则在时间  $t$  内突发失效的阈值分布函数为

$$D(t) = D_1 - \beta_2 u - \beta_3 (t - u), \quad (6)$$

式中:  $\beta_2 \sim N(\mu_{\beta_2}, \delta_{\beta_2}^2)$ ;  $\beta_3 \sim N(\mu_{\beta_3}, \delta_{\beta_3}^2)$ 。

### 3 极值冲击下产品的可靠度

在时间  $t$  内, 考虑产品的性能退化失效和突发失效 2 种模式同时存在的条件下, 产品的可靠度可以表示为

$$R(t) = \sum_{i=0}^{\infty} R(t|N(t) = i) P(N(t) = i), \quad (7)$$

式中:  $R(t|N(t) = i)$  为  $t$  时刻发生  $i$  次冲击下产品的可靠度;  $P(N(t) = i)$  为时间  $t$  内外界冲击载荷发生  $i$  次的概率。

$R(t)$  的计算较为复杂, 为了分析方便分以下 3 种情况讨论:

1) 在时间  $t$  内, 产品只发生了性能退化, 则其可靠度为

$$R_1(t) = P(X(t) < H(t) | N(t) = 0) P(N(t) = 0) = \Phi \left( \frac{H - \mu_{\beta_0} t - (\mu_{\beta_1} t + \varphi)}{\sqrt{\delta_{\beta_0}^2 t^2 + \delta_{\beta_1}^2 t^2}} \right) \exp(-\lambda t). \quad (8)$$

2) 在时间  $t$  内, 总的性能退化量小于  $L$  且有外界冲击载荷作用于产品, 则产品可靠度为

$$R_2(t) = \sum_{i=1}^{\infty} P(X(t) + S(t) < L(t) | N(t) = i) \cdot P(N(t) = i) \cdot P \left( \bigcap_{i=1}^{\infty} \{W_i < D(t)\} \right) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi \left( \frac{L - \mu_{\beta_0} t - (\mu_{\beta_1} t + \varphi + i\mu_Y)}{\sqrt{\delta_{\beta_0}^2 t^2 + \delta_{\beta_1}^2 t^2 + i\delta_Y^2}} \right) \cdot \Phi \left( \frac{D_0 - (\mu_{\beta_2} t + \mu_w)}{\sqrt{\delta_w^2 + \delta_{\beta_2}^2 t^2}} \right) \frac{\exp(-\lambda t)(\lambda t)^i}{i!}. \quad (9)$$

3) 在时间  $t$  内, 总的性能退化量大于  $L$  且小于  $H$ , 且有外界冲击载荷作用于产品, 则产品可靠度为

$$R_3(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=0}^i P(X_{S1}(u) < L(u) | N(u) = k) \cdot P(L(t - u) \leq X_{S2}(t - u) < H(t - u) | N(t - u) = i - k) \cdot P(N(u) = k) \cdot P(N(t - u) = i - k) \cdot P \left( \bigcap_{i=1}^{\infty} \{W_i < D(t)\} \right). \quad (10)$$

为了分析方便需要假定几个参数, 把性能退化量刚好到达  $L$  的时刻记为  $u$ , 时间  $t$  内的冲击次数记为  $i$ , 在时间  $u$  内冲击的次数记为  $k$ , 那么  $[u, t]$  区间内的冲击次数为  $(i - k)$ 。在时间  $u$  内, 把性能退化

量小于  $L$  且外界冲击次数为  $k$  次条件下产品不发生性能退化失效的概率函数记为  $F_X(k, x, u)$ , 则

$$F_X(k, x, u) = \sum_{i=0}^{\infty} P(X(u) + S(u) < L(u) | N(u) = k) = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi \left( \frac{L - \mu_{\beta_0} u - (\mu_{\beta_1} u + \varphi + k\mu_Y)}{\sqrt{\delta_{\beta_0}^2 u^2 + \delta_{\beta_1}^2 u^2 + k\delta_Y^2}} \right), \quad (11)$$

产品在时间  $t$  内的可靠度为

$$R_3(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=0}^i \int_0^t \Phi \left( \frac{D_0 - [\mu_{\beta_2} u + \mu_{\beta_3}(t-u) + \mu_w]}{\sqrt{\delta_w^2 + \delta_{\beta_2}^2 u^2 + \delta_{\beta_3}^2 (t-u)^2}} \right) \frac{\exp[-\lambda(t-u)][\lambda(t-u)]^{i-k}}{(i-k)!} \Phi \left( \frac{H - L - \mu_{\beta_0}(t-u) - [\mu_{\beta_1}(t-u) + \varphi + (i-k)\mu_Y]}{\sqrt{\delta_{\beta_1}^2 (t-u)^2 + \delta_{\beta_0}^2 t^2 + (i-k)\delta_Y^2}} \right) \exp(-\lambda u) \frac{(\lambda u)^k}{k!} f_X(k, x, u) du. \quad (12)$$

机械产品在外界冲击载荷为极值冲击的前提下, 在工作时间  $t$  内其工作状态是上述 3 种情况之一, 因此时间  $t$  内产品的可靠度为

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) + R_3(t). \quad (13)$$

#### 4 运行冲击下产品的可靠度

如图 3 所示, 在运行冲击模型中, 如果有连续  $m$  个外载荷大于某个固定阈值  $D_2$  或者大于突发失效阈值  $D(t)$  的时候, 就会发生运行冲击失效<sup>[14]</sup>。

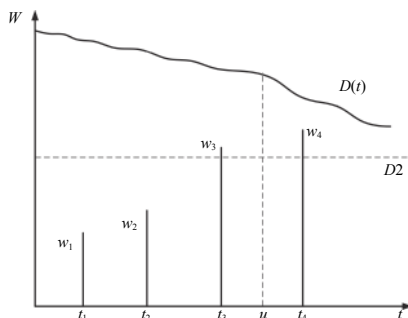


图 3 运行冲击模型

Fig. 3 Operation shock model

为了分析方便首先定义  $U_i$  为在  $i$  次外界冲击载荷中不会有连续  $m$  个冲击载荷大于某个固定阈值  $D_2$  的概率,  $U_i$  应该满足

$$U_i = QU_{i-1} + PQU_{i-2} + P^2QU_{i-3} + \dots + P^{m-1}QU_{i-m}. \quad (14)$$

式中:  $P$  为冲击载荷大于固定阈值  $D_2$  并且小于失

效阈值  $D_1$  的概率;  $Q$  为冲击载荷小于固定阈值  $D_2$  的概率。  $P$ 、 $Q$  的表达式分别为:

$$P = P(W_i > D_2 | W_i < D_1) = \frac{P(D_2 < W_i < D_1)}{P(W_i < D_1)} = \frac{F_W(D_1) - F_W(D_2)}{F_W(D_1)};$$

$$Q = 1 - P = P(W_i < D_2 | W_i < D_1) = \frac{P(W_i < D_2)}{P(W_i < D_1)} = \frac{F_W(D_2)}{F_W(D_1)}. \quad (15)$$

分 3 种情况考虑产品在时间  $t$  内的可靠度:

1) 在时间  $t$  内, 产品只发生了性能退化, 则其可靠度为

$$R_1(t) = P(X(t) < H | N(t) = 0) P(N(t) = 0) = \Phi \left( \frac{H - \mu_{\beta_0} t - (\mu_{\beta_1} t + \varphi)}{\delta_{\beta_1} t} \right) \exp(-\lambda t). \quad (16)$$

2) 在时间  $t$  内, 总的性能退化量小于  $L$  且有外界冲击载荷作用于产品, 则产品可靠度为

$$R_2(t) = \sum_{i=1}^{\infty} P(X(t) + S(t) < H(t) | N(t) = i) \cdot P(N(t) = i) P \left( \bigcap_{i=1}^{\infty} \{W_i < D(t)\} \right) U_i = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi \left( \frac{L - \mu_{\beta_0} t - (\mu_{\beta_1} t + \varphi + i\mu_Y)}{\sqrt{\delta_{\beta_1}^2 t^2 + i\delta_Y^2}} \right) \Phi \left( \frac{D_1 - (\mu_{\beta_2} t + \mu_w)}{\sqrt{\delta_w^2 + \delta_{\beta_2}^2 t^2}} \right) \frac{\exp(-\lambda t)(\lambda t)^i}{i!} U_i. \quad (17)$$

3) 在时间  $t$  内, 总的性能退化量大于  $L$  且小于  $H$ , 且有外界冲击载荷作用于产品, 则产品可靠度为

$$R_3(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=0}^i \int_0^t \Phi \left( \frac{D_1 - [\mu_{\beta_2} u + \mu_{\beta_3}(t-u) + \mu_w]}{\sqrt{\delta_w^2 + \delta_{\beta_2}^2 u^2 + \delta_{\beta_3}^2 (t-u)^2}} \right) \frac{\exp[-\lambda(t-u)][\lambda(t-u)]^{i-k}}{(i-k)!} \Phi \left( \frac{H - L - \mu_{\beta_0}(t-u) - [\mu_{\beta_1}(t-u) + \varphi + (i-k)\mu_Y]}{\sqrt{\delta_{\beta_1}^2 (t-u)^2 + \delta_{\beta_0}^2 t^2 + (i-k)\delta_Y^2}} \right) \exp(-\lambda u) \frac{(\lambda u)^k}{k!} f_X(k, x, u) U_i du. \quad (18)$$

综合以上 3 种情况, 产品在时刻  $t$  的可靠度为

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) + R_3(t). \quad (19)$$

#### 5 实例分析

根据美国 Sandia 国家实验室进行的一项实验研究发现, 一种包括正交梳状驱动执行机构和相互

机械连接的旋转齿的微型发动机，其梳齿传动的线性位移通过销传递到齿轮上。微引擎参数如表 1 所示，随着工作过程的进行，齿轮与销连接的表面会有明显的磨损。产品正常工作时的载荷和外载荷的冲击导致磨损，外部冲击会导致微型发动机的零部件突然断裂，这 2 个失效模式都可能导致微型发动机失效。

表 1 微引擎可靠性分析参数

Table 1 Parameter values for micro-engine reliability analysis

参数	值	数据来源
$D_0/\text{GPa}$	1.2	假设
$D_1/\text{GPa}$	1.4	文献[15]
$D_2/\text{GPa}$	1.3	假设
$H_0/\mu\text{m}^3$	0.001 25	文献[15]
$L/\mu\text{m}^3$	$7 \times 10^{-4}$	假设
$\beta_0/\mu\text{m}^3$	$\mu_{\beta 0} = 1.2 \times 10^{-9}$ $\sigma_{\beta 0} = 1 \times 10^{-9}$	假设
$\beta_1/\mu\text{m}^3$	$\mu_{\beta 1} = 8.48 \times 10^{-9}$ $\sigma_{\beta 1} = 6 \times 10^{-10}$	文献[15]
$\beta_2/\mu\text{m}^3$	$\mu_{\beta 2} = 1 \times 10^{-5}$ $\sigma_{\beta 2} = 1 \times 10^{-6}$	假设
$\beta_3/\mu\text{m}^3$	$\mu_{\beta 3} = 1 \times 10^{-5}$ $\sigma_{\beta 3} = 1 \times 10^{-6}$	假设
$\lambda/\text{转}$	$5 \times 10^{-5}$	假设
$Y_i/\mu\text{m}^3$	$\mu_Y = 1 \times 10^{-4}$ $\sigma_Y = 2 \times 10^{-5}$	文献[15]
$W_i/\mu\text{m}^3$	$\mu_W = 1.2$ $\sigma_W = 0.2$	假设
$P$	0.131 0	假设
$Q$	0.869 0	假设

### 5.1 基于极值冲击的产品可靠性分析

产品在极值冲击的工作环境下，将表 1 中的数据代入式 (13)，得到微引擎的可靠度函数，如图 4 和图 5 所示。

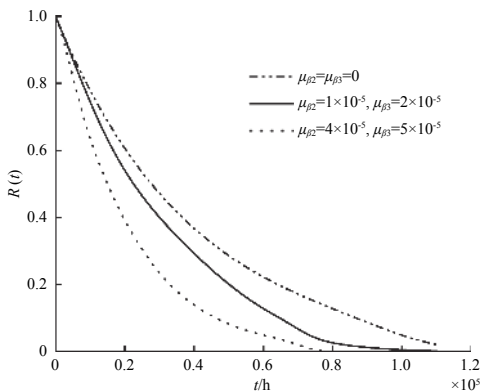


图 4 极值冲击情况下不同失效阈值变化速率下的产品可靠度  
Fig. 4 Product reliability at different failure threshold degradation rates in extreme operation shock

根据式 (13) 可知，突发失效阈值的变化速率  $\mu_{\beta 2}$  和  $\mu_{\beta 3}$  都对产品可靠度有影响。为了便于分析，分别给出了 3 组数据。通过图 4 可以看到：不考虑突发失效阈值的变化，产品的可靠度会被高估；当失

效阈值变化速率变大时，可靠度曲线向左偏移，说明在一定范围内随着突发失效阈值变化速率的增大，产品的可靠度降低。

根据上文分析可以得知，当性能退化量达到  $L$  时，产品抵抗冲击能力减弱，即突发失效阈值变化速率发生改变。在其他参数和工作时间不变的情况下，通过改变  $L$  的大小来研究其对产品可靠度的影响。图 5 分别给出了 3 组不同的  $L$  值，可以看到：在一定范围内随着  $L$  的逐渐变大，产品的可靠度也随之提高。这是因为  $L$  越小，突发失效阈值变化速率增大的条件越容易被满足。

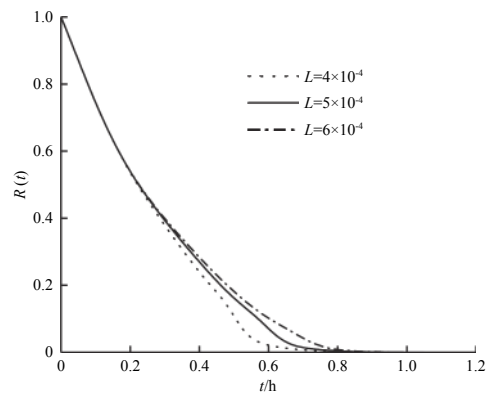


图 5 极值冲击情况下不同  $L$  值下的产品可靠度  
Fig. 5 Product reliability for different values of  $L$  in extreme operation shock

### 5.2 基于运行冲击的产品可靠性分析

在外界冲击为运行冲击的情况下，将表 1 中的数据代入式 (19)，得到微引擎的可靠度函数，如图 6 和图 7 所示。

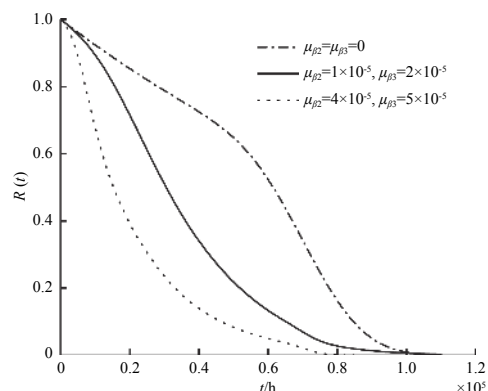


图 6 运行冲击情况下不同失效阈值变化速率下的产品可靠度  
Fig. 6 Product reliability at different failure threshold degradation rates in operation shock

失效阈值变化速率对运行冲击模型可靠度的影响与对极值冲击模型可靠度的影响相似。在其他参数不变的条件下，给出了 3 种失效阈值的变化速

率。通过图6可以看到,在一定范围内,随着失效阈值变化速率的增加,产品的可靠度降低。

数值 $L$ 对运行冲击模型可靠度的影响与对极值冲击模型可靠度的影响相似。在其他参数不变的情况下,给出了3组不同的 $L$ 值。通过图7可以看到,在一定范围内随着 $L$ 变大,产品的可靠度提高。

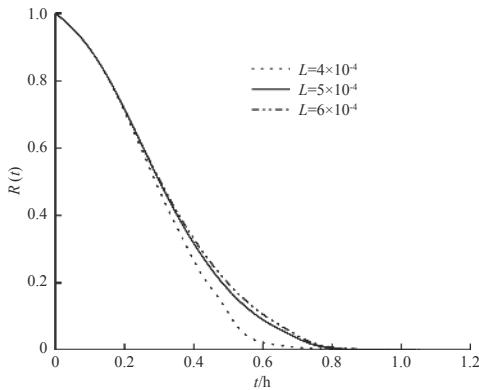


图7 运行冲击情况下不同 $L$ 值下的产品可靠度

Fig. 7 Product reliability for different values of  $L$  in operation shock

## 6 结论

本文研究了在外界冲击为极值冲击和运行冲击的情况下,突发失效与性能退化同时存在下机械产品失效阈值变化速率对产品可靠度的影响。

结果表明:1)忽略机械产品突发失效阈值的变化,机械产品的可靠度会被高估;2)突发失效阈值的变化速率会影响机械产品的可靠度,在一定范围内,随着变化速率的逐渐增大,机械产品的可靠度逐渐下降;3)决定失效阈值变化速率的性能退化量 $L$ 对产品可靠度有影响。在一定范围内,随着性能退化量 $L$ 变大,产品的可靠度提高。

### 参考文献 (References)

- [1] 尹继东. 基于性能退化数据的产品竞争失效可靠性评估方法及理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018: 13-17
- [2] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 228-234  
DENG A M, CHEN X, ZHANG C H, et al. Reliability evaluation based on performance degradation data[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 228-234
- [3] CRK V. Reliability assessment from degradation data[C]// Reliability & Maintainability Symposium, IEEE Proceedings. Los Angeles, CA, 2000: 155-161
- [4] PARK C, PADGETT W J. Stochastic degradation models with several accelerating variables[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, 55(2): 379-390
- [5] 袁容. 基于性能退化分析的可靠性方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 77-83
- [6] LI W, PHAM H. An inspection-maintenance model for systems with multiple competing processes[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2): 318-327
- [7] WANG Z L, HUANG H Z, DU L, et al. Reliability analysis on competitive failure processes under fuzzy degradation data[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(3): 2964-2973
- [8] 刘晓娟, 王华伟, 徐璇. 考虑多退化失效和突发失效之间竞争失效的可靠性评估方法[J]. 中国机械工程, 2017, 28(1): 7-12  
LIU X J, WANG H W, XU X. Reliability assessment based on competition failure considering multi-degradation and catastrophic failure[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(1): 7-12
- [9] AN Z W, SUN D M. Reliability modeling for systems subject to multiple dependent competing failure processes with shock loads above a certain level[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 129-138
- [10] RAFIEE K, FENG Q, COIT D W. Reliability modeling for dependent competing failure processes with changing degradation rate[J]. IIE Transactions, 2014, 46(5): 483-496
- [11] 黄文平, 周经伦, 宁菊红, 等. 基于变失效阈值的竞争失效可靠性模型[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(4): 941-946  
HUANG W P, ZHOU J L, NING J H, et al. Reliability model for competing failure with shift thresholds[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(4): 941-946
- [12] JIANG L, FENG Q, COIT D W. Reliability and maintenance modeling for dependent competing failure processes with shifting failure thresholds[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(4): 932-948
- [13] RAFIEE K, FENG Q, COIT D W. Reliability assessment of competing risks with generalized mixed shock models[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 159: 1-11
- [14] RAFIEE K, FENG Q, COIT D W. Reliability modeling for dependent competing failure processes with changing degradation rate[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 46(5): 483-49
- [15] TANNER D M, DUGGER M T. Wear mechanisms in a reliability methodology[J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 4980: 22-40

(编辑: 冯露漪)