

文章编号 1004-924X(2017)07-1783-07

# 累积冲击作用下可恢复退化过程的可靠度评估

齐 佳, 周 真\*, 李翰斌, 马德仲

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**以对激光器进行可靠度评估为背景,在考虑累积冲击与自然退化同时引起产品失效的基础上,重点研究了冲击时间间隔对产品退化量的影响,建立了累积冲击作用下可恢复的退化模型。根据自然退化过程及泊松冲击更新理论,研究了累积冲击模型和累积冲击下的退化失效模型。引入条件分布,分析冲击时间间隔对退化量的影响,得出了累积泊松冲击下的可恢复退化失效模型。结合性能退化分析,给出了可恢复的退化过程的失效分布函数和可靠度函数。进行了激光器退化试验,结果表明:当激光器工作 2 000 h 时,利用累积冲击下可恢复的退化失效模型评估得到的可靠度为 0.53,与仿真结果相符,为利用累积冲击下退化失效模型评估得到的可靠度的 2.79 倍。结果验证了本文提出的利用可恢复的退化模型进行可靠度评估的合理性。

**关键词:**产品评估;可靠度评估;退化过程;Wiener 过程;泊松冲击;累积冲击

**中图分类号:**TB114.3;TN242 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172507.1783

## Reliability evaluation of recoverable degradation process under cumulative shock

QI Jia, ZHOU Zhen\*, LI Han-bin, MA De-zhong

(School of Measurement and Communication Engineering,  
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

\* Corresponding author, E-mail:zhzh49@126.com

**Abstract:** For evaluating the reliability of lasers, this paper focuses on the effects of shock time intervals on the product degradation based on the product failure from both nature degradation process and cumulative shock process. Then it establishes a recoverable degradation model in cumulative shock process. Based on natural degradation process and Poisson shock renewal theory, a cumulative shock model and a degradation failure model under cumulative shock are presented. According to the model above mentioned, the effect of shock time interval on degradation is analyzed by introducing the condition distribution and the recoverable degradation failure model under the cumulative Poisson Shock is obtained. After analyzing the performance degradation, the failure distribution function and the reliability function of the recoverable degradation process are given. A laser performance degradation experiment is performed and the results indicate that when the lasers run for 2 000 h, the reliability is 0.53 by the recoverable degradation failure model under the cumulative shock, which is

收稿日期:2016-09-18;修订日期:2016-11-10.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61501149);黑龙江省自然科学基金资助项目(No. QC2016068);黑龙江省科技厅科研基金资助项目(No. F201305)

more consistent with simulation result, and is 2.79 times as much as the result by the degradation failure model under cumulative shock. It verifies the rationality of evaluation by the proposed recoverable degradation failure model.

**Key words:** product evaluation; reliability evaluation; degradation process; Wiener process; Poisson shock; cumulative shock

## 1 引言

基于性能退化的可靠性建模与分析技术,是解决小子样、长寿命产品的可靠性评估的关键技术。由于产品性能退化过程存在随机性的特点,近年来,国内外许多学者致力于利用 Wiener 过程建立退化模型并进行可靠度评估方面的研究。Feng 等利用多阶段 Wiener 过程模型研究了电容器贮存可靠性,并给出了退化模型的参数估计方法及贮存可靠度评估方法<sup>[1]</sup>。Tsai 等采用线性漂移 Wiener 过程描述激光器的退化过程,并进行了可靠度评估<sup>[2]</sup>。周月阁等建立了发光二极管(LED)驱动光源的 Wiener 过程退化模型,并最终推导出失效分布函数及可靠度函数<sup>[3]</sup>。蔡忠义等讨论了性能退化服从 Wiener 过程的可靠度评估方法<sup>[4]</sup>。然而,Wiener 过程仅能描述由于内部因素引起的自然退化过程,而在实际使用过程中,产品还承受外部的冲击作用,且外部冲击常常是引起产品失效的重要因素。因此,仅考虑自然退化过程并进行可靠度评估存在明显的局限性。

在产品服役过程中,绝大多数冲击不会导致产品性能显著恶化,但在一定时间内,这些冲击造成的损伤量具有累积效应<sup>[5-7]</sup>。冲击不仅会造成累积损伤,还与自然退化过程相叠加使产品退化量增多,最终导致产品失效。Peng 等在 Wiener 过程的基础上,考虑了冲击强度固定时产品退化量增加的情况,建立了累积冲击下的退化失效模型,并依据经验给出了冲击对产品造成的损伤量,在此基础上推导出了可靠度函数<sup>[8]</sup>。Jiang、苏春等也考虑了泊松冲击导致退化量增加的情况,建立了累积冲击下的退化失效模型,并认为每次冲击幅值及持续时间等因素不同,即讨论了冲击强度随机时对产品退化量的影响<sup>[9-10]</sup>。Wang 等也建立了累积冲击下的退化失效模型,并指出当冲击强度大于某一固定值,产品的退化量会增加,否则,产品可能恢复由冲击造成的损伤<sup>[11]</sup>。该条件

只适用于冲击时间间隔一定的情况下,当冲击时间间隔足够大时,即使冲击强度大于某一固定值,产品仍可能恢复由冲击产生的损伤,而冲击时间间隔足够小时,即使冲击强度小于某一固定值,退化量也可能增加。目前,涉及外部冲击对产品性能退化量影响的相关研究较少,且主要集中在冲击强度对产品性能退化量的影响,而忽略了冲击时间间隔对退化量的影响。另外,多数文献依据经验假设等给出冲击对产品造成的损伤量,在一定程度上降低了产品存在的差异性,尤其针对特殊型号的产品,需实测每次冲击造成的损伤量。

本文研究了冲击时间间隔对退化量的影响,即通过引入条件分布,修正了累积泊松冲击下的退化失效模型,得到了累积泊松冲击下可恢复的退化失效模型,并建立了相应的可靠度函数。以激光器退化试验为例,改变依据经验获取损伤量的方法,直接测出了每次冲击对产品造成的损伤量。利用本文提出的修正后的模型进行可靠度评估,且与累积冲击下退化失效模型的评估结果和蒙特卡洛仿真结果进行对比分析,验证了本文提出的利用可恢复退化模型进行可靠度评估的合理性。

## 2 外部冲击作用下的可靠性分析

### 2.1 可靠性问题描述

实际使用过程中,产品受冲击和自然退化的共同作用,它们均是引起失效的重要因素。图 1(a)表示产品不承受任何冲击时的自然退化过程。图 1(b)假设产品在服役过程中受随机冲击,且每次冲击会造成一定程度上的损伤,图中, $t_i$  表示第  $i$  次冲击发生的时刻, $Y_i$  ( $i=0,1,2,\dots$ ) 表示泊松冲击对产品性能造成的损伤量,且服从正态分布, $T_i$  表示冲击时间间隔,其服从参数为  $1/\lambda$  的指数分布,产品受到冲击的次数服从参数为  $\lambda t$  的泊松过程。图 1(c)表示产品受外部冲击和内部退化共同作用时总的退化过程。由于产品具有

恢复性能,冲击引起的损伤并不是绝对的,当两次连续冲击的时间间隔  $T_i$  大于  $\tau$  时,产品可能恢复由前次冲击造成的损伤,当冲击时间间隔  $T_i$  小于  $\tau$  时,冲击会对退化过程造成损伤。随着服役时间的增加,其退化量不断增加,当退化量超过某一阈值时,认为产品失效。

### 2.2 性能退化建模

#### 2.2.1 基本假设

假设1 产品的自然退化量记为  $X(t)$ ,其退化过程为 Wiener 过程,即性能退化是由很多微小损伤量所造成的均匀而平缓的过程。

假设2 产品在使用过程中受到冲击作用,且  $[0, t]$  时间内受到冲击的次数  $N(t)$  服从泊松过程。

假设3 产品的退化失效是由内部性能退化

和外部冲击共同引起的,当两者的累积退化量达到失效阈值时,产品发生退化失效。

假设4 当两次冲击的时间间隔大于恢复时间  $\tau$  时,产品可恢复由前次冲击造成的损伤,当冲击时间间隔小于  $\tau$  时,会对产品造成损伤,并且在一定时间内产品受到的冲击具有累积效应。

假设5 产品所受冲击次数与每次冲击造成的产品性能损伤量相互独立。

#### 2.2.2 自然退化过程

产品的自然退化服从 Wiener 过程,是平稳独立高斯增量的随机过程,自然退化量  $X(t)$  的表达式为:

$$X(t) = \mu t + \sigma B(t),$$

式中:参数  $\mu$  为漂移参数,  $\sigma$  为扩散参数;  $B(t)$  为

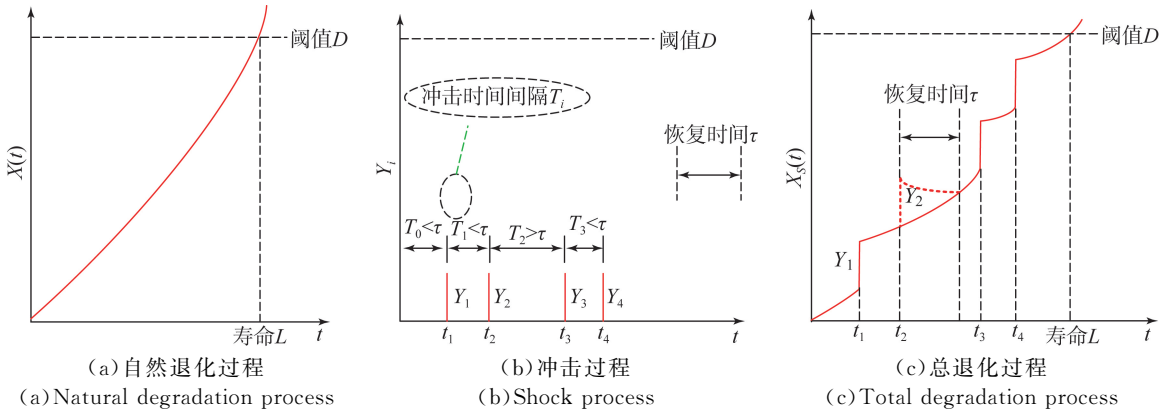


图1 产品性能退化过程

Fig. 1 Degradation processes of product performance

标准布朗运动,且  $E[B(t)] = 0, E[B(t_1), B(t_2)] = \min(t_1, t_2)$ 。

Wiener 退化过程满足以下的性质:

(1) 时刻  $t$  到  $t + \Delta t$  之间的自然退化增量  $\Delta X$  服从正态分布,即  $\Delta X = X(t + \Delta t) - X(t) \sim N(\mu \Delta t, \sigma^2 \Delta t)$ ;

(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  $X(t_4) - X(t_3)$  与  $X(t_2) - X(t_1)$  相互独立;

(3)  $X(0) = 0$ , 且  $X(t)$  在  $t = 0$  处连续。

#### 2.2.3 累积冲击下的退化失效模型

假设第  $i$  次冲击对性能退化的影响为  $Y_i (i = 0, 1, 2, \dots)$ , 且冲击的作用是累积可加的,  $\{Y_i\}$

序列非负,独立同分布,  $t_i$  表示第  $i$  次冲击到达的时刻,  $T_i$  代表第  $i$  次冲击与第  $i + 1$  次冲击的时间间隔, 令随机变量  $N(t) (t \geq 0)$  表示时刻  $t$  为止的总冲击次数, 且冲击次数服从参数为  $\lambda t$  的泊松随机过程, 则  $t$  时刻冲击发生  $i$  次的概率为:

$$P\{N(t) = i\} = \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}. \tag{1}$$

到  $t$  时刻止, 冲击对产品造成的损伤累积量为:

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

由更新过程可得,  $S(t)$  的分布函数为:

$$P\{S(t) \leq x\} = P\left\{\sum_{i=0}^{N(t)} Y_i \leq x\right\} = \sum_{j=0}^{\infty} P\left\{\sum_{i=0}^{N(t)} Y_i \leq x \mid N(t) = j\right\} P\{N(t) = j\} = \sum_{j=0}^{\infty} G^j(x) [F^{(j)}(t) - F^{(j+1)}(t)], \quad (2)$$

其中:

$$P[N(t) = j] = P\{t_j \leq t, t_{j+1} > t\} = F^{(j)}(t) - F^{(j+1)}(t).$$

式中  $F(t)$  是连续冲击时间间隔分布函数,  $F^{(j)}(t)$  是  $F(t)$  的  $j$  次卷积,  $G(t)$  是每次冲击造成损伤量  $Y_i$  的分布函数,  $G^{(j)}(t)$  是  $G(t)$  的  $j$  次卷积。

产品总的性能退化量  $X_S(t)$  是自然退化量  $X(t)$  和冲击造成的累积损伤量  $S(t)$  共同作用引起的:

$$X_S(t) = X(t) + S(t), \quad (3)$$

故  $t$  时刻退化失效概率分布函数为:

$$F_x(t) = P\{X(t) + S(t) < D\} = P\left\{X(t) + \sum_{i=1}^{N(t)} Y_i < D\right\} = \sum_{i=0}^n P\left\{\left(X(t) + \sum_{i=1}^{N(t)} Y_i < D\right) \mid N(t) = j\right\} \times P\{N(t) = j\}. \quad (4)$$

#### 2.2.4 累积冲击下可恢复的退化模型及可靠度分析

当两次冲击时间间隔大于恢复时间  $\tau$  时, 产品可以恢复由前次冲击造成的损伤, 当两次冲击的间隔时间小于  $\tau$  时, 冲击会导致产品性能产生损伤  $Y_i$ , 且冲击对产品产生的损伤量服从正态分布, 即  $Y_i \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ , 此时:

$$P\{Y_i \cdot F(\tau) > x\} = P\{Y_i > x, T_i \leq \tau\} +$$

$$P\{Y_i > x, T_i > \tau\} = (1 - e^{-\lambda\tau}) \cdot \left(1 - \Phi\left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1}\right)\right),$$

则  $Y_i \cdot F(\tau)$  的概率密度函数为:

$$f(t) = (1 - e^{-\lambda\tau}) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}.$$

由中心极限定理可知,  $\sum_{i=1}^{N(t)} Y_i F(\tau)$  服从正态分布, 且:

$$E\left\{\sum_{i=1}^{N(t)} Y_i F(\tau)\right\} = n\mu_1(1 - e^{-\lambda\tau}), \quad (5)$$

$$D\left(\sum_{i=1}^{N(t)} Y_i F(\tau)\right) = (1 - e^{-\lambda\tau})n\sigma_1^2, \quad (6)$$

故  $\sum_{i=1}^{N(t)} Y_i F(\tau) \sim N[n(1 - e^{-\lambda\tau})\mu_1, n(1 - e^{-\lambda\tau})\sigma_1^2]$ ,

累积冲击作用下的损伤量为  $E\left\{\sum_{i=1}^{N(t)} Y_i\right\} = n\mu_1$ .

引入条件分布, 考虑冲击时间间隔对产品退化量的影响时, 产品性能恢复的损伤量为:

$$E\left\{\sum_{i=1}^{N(t)} Y_i\right\} - E\left\{\sum_{i=1}^{N(t)} Y_i F(\tau)\right\} = n\mu_1 e^{-\lambda\tau}. \quad (7)$$

$t$  时刻退化失效概率分布函数:

$$F_x(t) = P\{X(t) + S(t) < D\} =$$

$$P\left\{X(t) + \sum_{i=1}^{N(t)} Y_i F(\tau) < D\right\} = \sum_{i=0}^n P\left\{\left(X(t) + \sum_{i=1}^{N(t)} Y_i F(\tau) < D\right) \mid N(t) = j\right\} \times P\{N(t) = j\} = \sum_{i=0}^n \Phi\left(\frac{D - \mu(t) - n(1 - e^{-\lambda\tau})\mu_1}{\sqrt{n(1 - e^{-\lambda\tau})\sigma_1^2 + \sigma_x^2}}\right) \cdot \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}. \quad (8)$$

产品处于各个状态的概率:

$$P_i = P\{N(t) = i\} P\left\{X(t) + \sum_{i=1}^{N(t)} Y_i F(\tau) < D\right\} = \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!} \cdot \Phi\left(\frac{D - \mu(t) - n(1 - e^{-\lambda\tau})\mu_1}{\sqrt{n(1 - e^{-\lambda\tau})\sigma_1^2 + \sigma_x^2}}\right). \quad (9)$$

产品的可靠度函数为:

$$R(t) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i = \Phi\left(\frac{D - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) e^{-\lambda t} + \sum_{i=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{D - \mu(t) - i(1 - e^{-\lambda\tau})\mu_1}{\sqrt{i(1 - e^{-\lambda\tau})\sigma_1^2 + \sigma^2(t)}}\right) \cdot \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!} = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi\left(\frac{D - \mu(t) - i(1 - e^{-\lambda\tau})\mu_1}{\sqrt{i(1 - e^{-\lambda\tau})\sigma_1^2 + \sigma^2(t)}}\right) \cdot \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!}. \quad (10)$$

累积冲击退化失效模型的可靠度函数为:

$$R(t) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i = \Phi\left(\frac{D - \mu(t)}{\sigma(t)}\right) e^{-\lambda t} + \sum_{i=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{D - \mu(t) - i\mu_1}{\sqrt{i\sigma_1^2 + \sigma^2(t)}}\right) \cdot \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!} = \sum_{i=0}^{\infty} \Phi\left(\frac{D - \mu(t) - i\mu_1}{\sqrt{i\sigma_1^2 + \sigma^2(t)}}\right) \cdot \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!}. \quad (11)$$

### 3 激光器退化试验分析

半导体激光器是一类典型的高可靠、长寿命产品, 且半导体激光器可直接用来进行高精度的材料表面处理和激光焊接<sup>[12]</sup>。由于生产加工水平、产品竞争力等要求的不断提高, 半导体激光器的可靠性研究受到学者的广泛关注<sup>[13]</sup>。

半导体激光器的可靠性试验分为恒电流和恒

功率两种驱动模式,其中恒功率工作模式与实际应用更相符,激光器的退化表现在为了维持功率的输出恒定,其驱动电流会逐渐增加<sup>[14]</sup>。文中的试验以恒功率模式对激光器进行退化研究。将10台GaAs激光器编号为1~10,并在25℃下进行退化试验,失效阈值 $D=10$ (即当电流增加量达到初始电流的10%时认为失效)。在初始时刻 $t=0$ 时,认为所有激光器的电流增加量为0,每隔50h记录一次数据。编号1~5只进行自然退化试验。

$\Delta X_{ij}(i=1,2,\dots,10)$ 表示编号为 $i$ 的激光器在 $j$ 时刻的自然退化量。经分析发现,在相同 $\Delta j$ 时间内, $\Delta X_{1j}, \Delta X_{2j}, \dots, \Delta X_{10j}$ 差异不大;且针对单个激光器(如 $i=1$ ), $\Delta j$ 大小相同时,激光器的自然退化量 $\Delta X$ 差异也不大。这里列出自然退化过程中的部分退化量,如表1所示。

表1 激光器工作电流的自然退化数据

Tab.1 Natural degradation of laser operating current (%)

时间/h	激光器编号				
	1	2	3	4	5
50	0.09	0.13	0.06	0.11	0.14
100	0.23	0.27	0.17	0.19	0.23
200	0.49	0.54	0.39	0.40	0.53
500	0.93	1.27	1.19	1.22	1.36
1 000	2.34	1.99	2.79	1.96	2.87

对自然退化数据进行分析,可得激光器性能退化数据在不同时刻的样本均值和样本标准差,并且激光器性能退化量的样本均值和方差均是时间 $t$ 的函数,则自然退化过程参数为:

$$\mu(t) = 0.0024t - 0.0108,$$

$$\sigma(t) = 0.0004t - 0.0039.$$

编号6~10的激光器在自然退化的过程中还受到电流冲击作用。冲击幅值为1.67倍额定电流,且在每次冲击的前后都测试激光器的性能,并计算分析得到冲击过程对激光器性能退化的损伤量。由于冲击幅值为固定值,且激光器的参数差异不大,测试显示,编号6~10激光器由冲击引起的损伤量差异不大。这里列举部分冲击对编号6~10激光器造成的平均损伤量,如表2所示。

表2 激光器受冲击后造成的平均损伤量

Tab.2 Average damage of lasers after shock

冲击次数(第 <i>i</i> 次)	1	2	3	4	5
损伤量(平均值)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
恢复时间/min	220	214	238	242	257

对冲击幅值造成的损伤量数据进行最优分布分析,可得 $Y_i \sim N(0.01, 0.03^2)$ ,且激光器的恢复时间 $\tau$ 约为4h。冲击时间间隔会对激光器的累积退化量造成影响,当两次冲击时间间隔大于4h时,激光器可恢复由前次冲击造成的损伤。利用MATLAB设计泊松冲击过程,其中冲击的次数 $N(t)$ 服从参数为 $0.05t$ 的泊松分布。随着时间 $t$ 的不断增长,冲击次数 $N(t)$ 会不断增加。所设计的冲击过程在 $[0, 100\text{h}]$ 内如图2所示,其中 $I$ 代表额定电流。这里列举编号6~10激光器的部分退化数据,如表3所示。

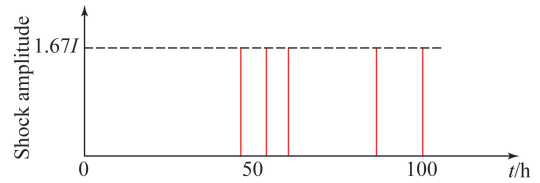


图2  $\lambda=0.05$ 的泊松冲击

Fig.2 Poisson shock at  $\lambda=0.05$

表3 编号6~10激光器工作电流的退化数据

Tab.3 Degradation of operating currents for lasers No.6~10 (%)

时间/h	激光器编号				
	6	7	8	9	10
50	0.16	0.21	0.19	0.23	0.22
100	0.31	0.36	0.26	0.37	0.31
200	0.49	0.46	0.50	0.60	0.41
500	1.23	1.23	1.47	1.85	1.42
1 000	2.66	2.57	3.14	3.72	2.97

将以上结果带入式(10)、式(11),并利用蒙特卡洛仿真对激光器的可靠度进行计算,结果如图3所示,图4为可恢复的累积冲击下退化失效模型与累积冲击下退化失效模型进行评估得到的结果的差值。

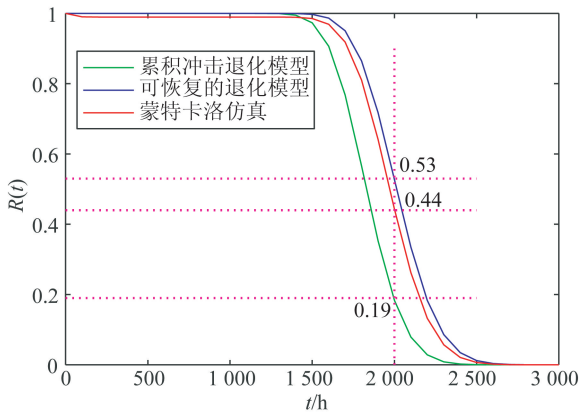


图 3 可靠度分析图

Fig. 3 Analysis diagram of reliability

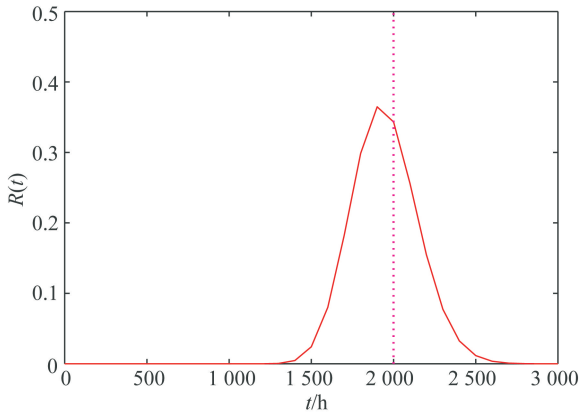


图 4 可靠度分析差值图

Fig. 4 Difference of reliability evaluation

由图 3 分析可知,针对服役时间短(1 500 h 之内,编号 6~10)的激光器,利用累积冲击退化模型或利用累积冲击作用下可恢复的退化模型进行可靠度评估时,结果差异不大,且均与蒙特卡洛仿真结果相符。但随着服役时间的不断增加,就需考虑冲击时间间隔对产品退化量的影响。因为利用累积冲击作用下的退化模型进行可靠度评估时(式(11)),认为冲击时间间隔对激光器的退化量造成的影响是绝对的,而利用可恢复退化模型评估时(式(10)),则认为当冲击时间间隔大于 4 h 时,激光器能够恢复由前次

冲击造成的损伤。且随着冲击次数的不断增加,激光器性能恢复的损伤量更大(式(7))。由图 4 分析可知,当服役超过 2 000 h 之后,性能恢复造成的损伤量的差异就不会逐渐增大,这是因为随着服役时间的增加,产品的恢复性能减弱,当服役 3 000 h 左右,激光器会全部失效(可靠度为 0)。另外,考虑冲击时间间隔对退化量的影响而进行可靠度评估时,结果存在差异。如当激光器工作 2 000 h 时,利用累积冲击退化模型进行可靠度评估时结果为 0.19,而利用累积泊松冲击下可恢复的退化失效模型进行可靠度评估时,结果为 0.53,两者差异较大,且后者与蒙特卡洛仿真结果 0.44 更相符。

综上,当服役时间  $t$  较短,冲击时间间隔  $T$  较长或恢复时间  $\tau$  较短时,累积冲击作用下可恢复的冲击模型可简化为累积冲击下的退化模型。而对服役时间  $t$  较长,且冲击时间间隔  $T$  小于恢复时间  $\tau$  时,则需利用累积冲击下可恢复的退化失效模型对产品进行可靠度评估,即需分析冲击时间间隔对产品退化量的影响。

## 4 结 论

本文以激光器这类高可靠、长寿命产品的可靠度评估为背景,在是否考虑累积冲击与自然退化同时引起产品失效的基础上,重点研究了冲击时间间隔对产品退化量的影响,得出了累积冲击下可恢复的退化失效模型,并给出了该模型可简化为累积冲击下的退化失效模型的条件。同时,文中指出利用可恢复的退化模型进行可靠度评估适用范围更广,即说明了当产品服役时间较长,且存在  $T < \tau$  时,利用本文讨论的方法才能获得准确的评估结果,并具体给出了服役 2 000 h 后可靠性的分析结果,验证了利用累积冲击下可恢复的退化失效模型进行可靠度评估的合理性。本文讨论的方法也适用于其他具有恢复性能产品的可靠度评估。

(8): 1317-1335.

- [2] TSAI C C, TSENG S T, BALAKRISHNAN N. Misspecification analyses of gamma and wiener degradation processes [J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2011, 141(12): 3725-3735.
- [3] 周月阁,朱奕,李享,等. LED 照明用驱动电源性能

## 参考文献:

- [1] FENG J, SUN Q, JIN T D. Storage life prediction for a high-performance capacitor using multi-phase wiener degradation model [J]. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 2012, 41

- 可靠性评估[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(9): 99-104.
- ZHOU Y G, ZHU Y, LI X, *et al.*. Performance reliability assessment of LED drivers for lighting [J]. *Electric Machines and Control*, 2014, 18(9): 99-104. (in Chinese)
- [4] 蔡忠义, 陈云翔, 项华春, 等. 融合先验加速退化与外场退化信息的可靠性评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(4): 970-976.
- CAI Z Y, CHEN Y X, XIANG H C, *et al.*. Reliability assessment method with integrated prior accelerated degradation and field degradation data[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(4): 970-976. (in Chinese)
- [5] 翟亚利, 张志华, 李大伟. 基于冲击理论的性能可靠性评估研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(10): 2108-2112.
- ZHAI Y L, ZHANG ZH H, LI D W. Performance reliability evaluation based on impact theory [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(10): 2108-2112. (in Chinese)
- [6] WANG Y P, PHAM H. Imperfect preventive maintenance policies for two-process cumulative damage model of degradation and random shocks [J]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2011, 2(1): 66-77.
- [7] SKOULAKIS G. A general shock model for a reliability system [J]. *Journal of Applied Probability*, 2000, 37(4): 925-935.
- [8] PENG H, FENG Q M, COIT D W. Reliability and maintenance modeling for systems subject to multiple dependent competing failure processes [J]. *IIE Transactions*, 2010, 43(1): 12-22.
- [9] JIANG L, FENG Q M, 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.
- [10] 苏春, 瞿众洲, 郝会兵. 考虑相关竞争故障过程及变动阈值的可靠性评估[J]. 东南大学学报(英文版), 2013, 29(1): 52-56.
- SU C, QU Z ZH, HAO H B. Reliability assessment considering dependent competing failure process and shifting-threshold [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2013, 29(1): 52-56. (in Chinese)
- [11] WANG Z L, HUANG H Z, LI Y F, *et al.*. An approach to reliability assessment under degradation and shock process [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2011, 60(4): 852-863.
- [12] 刘友强, 曹银花, 李景, 等. 激光加工用5kW光纤耦合半导体激光器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1279-1287.
- LIU Y Q, CAO Y H, LI J, *et al.*. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1279-1287. (in Chinese)
- [13] 全伟, 李光慧, 陈熙, 等. 一体化半导体激光器的ANSYS热仿真及结构设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1080-1086.
- QUAN W, LI G H, CHEN X, *et al.*. Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1080-1086. (in Chinese)
- [14] RAFIEE K, FENG Q M, COIT W. Condition-based maintenance for repairable deteriorating systems subject to a generalized mixed shock model [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2015, 64(4): 1164-1174.

#### 作者简介:



齐佳(1987—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2010年于烟台大学获得学士学位,2014年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,主要从事可靠性工程技术研究。E-mail: qjia89@163.com

#### 导师简介:



周真(1961—),男,辽宁大连人,教授,博士生导师,1983年于浙江大学获得学士学位,1991年、2005年于哈尔滨理工大学分别获得硕士、博士学位,现任哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院安全系主任,主要从事可靠性工程技术、生物信息检测等方面的研究。E-mail: zhzh49@126.com