

DOI: 10.3901/JME.2019.18.180

# 基于时间和当前状态的退化与冲击模型\*

王 嘉<sup>1,2</sup> 张露予<sup>1,2</sup> 陶友瑞<sup>1,2</sup> 李志刚<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300401;

2. 河北工业大学机械工程学院 天津 300401)

**摘要:** 电工装备、机械系统等工作环境复杂多变,运行过程中会遭受如老化、磨损等自身的自然退化过程,还面临诸如高温、高压等来自外界环境的随机冲击。由于系统自身的鲁棒性和抵抗冲击的能力会随着系统健康状态不同而发生改变,当系统处于相对健康状态时,其抵抗冲击能力较强,当系统健康状态较差时,其抵抗冲击能力随之下降,因此同样强度的冲击产生在系统不同健康状态时对系统造成的损伤也会存在差异。然而,现有研究通常忽略系统当前健康状态对随机冲击带给自然退化过程损伤的影响,当系统相对健康情况下可能低估其可靠性,反之则会高估其可靠性。提出一种时间状态相关的退化与冲击模型,该模型在通用退化路径模型的基础上,考虑将当前状态作为影响因子,纳入随机冲击对退化过程带来的损伤中,具体体现为嵌套一个与当前状态相关的状态函数。通过两个实例将提出的基于时间与当前状态的退化与冲击模型与仅考虑时间的退化与冲击模型进行了对比,结果表明:不考虑当前状态的退化与冲击模型会高估系统可靠性,并且在退化与冲击系统中同时考虑时间和系统当前健康状态获得的可靠性评估结果更加准确合理。

**关键词:** 随机冲击; 当前状态; 通用退化模型; 可靠性评估

**中图分类号:** TG156

## Degradation and Random Shock Model Based on Age and Current State

WANG Jia<sup>1,2</sup> ZHANG Luyu<sup>1,2</sup> TAO Yourui<sup>1,2</sup> LI Zhigang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,

Hebei University of Technology, Tianjin 300401;

2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401)

**Abstract:** Electrical and mechanical systems often suffer from competing risks, including degradation process, like aging, wear, etc., and random shocks such as extremely high temperature or sudden high voltage. While due to the fact that the resistance and robust of systems vary according to their health state, that is, the system's resistance to shocks is stronger when it is in a healthier state compared with that of a worse state. The reported work often does not consider the current state as a factor that can influence the consequence of shocks toward degradation process, which may underestimate the reliability when the system is healthier, and overestimate the reliability vice versa. Hence, an age-and state-dependent degradation and shock model based on general path model is proposed, in which the cumulative increments and the degradation process is considered to be dependent and governed by the current degradation state. Two examples are illustrated to demonstrate the advantages of the proposed model. The results show that models do not consider the influence of current degradation state may overestimate the reliability, and the proposed model with the consideration of current state can obtain a more realistic and reasonable result for reliability estimation.

**Key words:** random shocks; current state; general path model; reliability estimation

## 0 前言

可靠性研究领域涵盖状态监测、失效预警、剩余寿命预测、退化建模等,以期提高产品的安全性和可用性,减少维护和替换费用。针对样本量大、

寿命短、造价相对低廉的产品,传统方法主要通过失效寿命试验获取失效数据评估可靠性。然而目前工业生产、航空航天、国防军事等领域涉及到的系统庞大、设备可靠性高,服役周期长以及生产成本低,极大地限制了传统失效数据分析方法的应用。因此,基于退化模型的可靠性评估方案逐渐被采用。退化分析依靠产品失效的物理机制及采集到的历史退化数据进行建模,对产品、设备在正常服役过程中性能随时间衰退的过程进行研究。其中一些退化

\* 国家重点研发计划(2017YFB1301300)、国家自然科学基金(51675173)、国家科技支撑计划(2015BAA09B01)和河北省自然科学基金重点(E2017022284)资助项目。20180827 收到初稿,20190222 收到修改稿

模型的构建仅考虑系统自身退化过程,如文献[1-3],通过对退化过程趋势建模,评估可靠性、预测剩余寿命。然而一些电气、机械产品(如风电设备),因工作环境恶劣,其正常运行过程不仅经历设备自身自然退化(疲劳,磨损等),环境中的某些因素(如高温、高压以及风雨雷电等气候问题)也将带来一定程度的随机冲击<sup>[4-6]</sup>。根据冲击带来的影响不同,可将其分为致命冲击和非致命冲击:致命冲击会导致系统即刻失效,即硬失效;非致命冲击会带来随机退化增量,当其与系统自身退化累积产生的退化总量超过预设阈值时,系统被认为发生软失效<sup>[7]</sup>。

随机冲击会对退化过程造成一定的影响,越来越多学者针对该类问题开展研究。在退化与冲击模型研究领域中,一些模型假设退化过程和冲击过程相互独立<sup>[8-10]</sup>,即自然退化过程与随机冲击过程分别进行:随机冲击总体影响取决于其数量以及单个冲击的强度<sup>[9-11]</sup>,当冲击总量超过其阈值,或自然退化过程超过其阈值都将引发系统失效。然而这类模型忽略了退化过程与冲击之间的相关性,致使系统可靠性被低估,从而过早地进行维修更换,造成资源浪费。因此,目前大多退化与冲击模型将退化过程与随机冲击过程视为非独立。针对这种情况,CHA 和 FINKELSTEIN<sup>[12]</sup>提出一种基于随机冲击过程的退化模型,并指出冲击会对退化过程产生两种类型影响:导致系统即刻失效,以及缩短系统的实际使用时间,即减少系统的“年龄”。基于文献[13],LIN 等<sup>[14]</sup>提出一种多状态物理模型架构,该模型结合马尔科夫过程和随机冲击过程评估系统可靠性。尽管该模型考虑系统自身退化与随机冲击的相关性,但忽略了冲击会带给系统整体退化增量。SONG 等<sup>[15]</sup>提出一种基于磨损过程的退化与冲击模型,该模型针对多部件组成的系统,根据冲击自身的大小及造成的影响不同,有选择性的对某个或某些部件产生影响。随后,JIANG 等<sup>[16]</sup>根据冲击自身的强度将其划分入不同区间,冲击尺寸在特定区间会对系统退化产生累积效应,超过该区间则会引发系统失效。WANG 和 PHAM<sup>[17]</sup>提出了一种多退化与随机冲击混合模型,该模型考虑多种退化过程并存,并假设各种退化过程之间统计相关,用 copula 函数表示该相关性;另外,随机冲击过程与各退化过程之间同样具有相关性,体现为对退化过程整体增量及退化率的影响。PENG 等<sup>[18]</sup>提出一种累积冲击模型与极端冲击模型相结合的退化与冲击模型,基于该模型获取可靠度函数及失效时间分布函数的解析表达式,并提出了一种新的维修策略。

然而以上模型并未考虑当前状态对随机冲击带

来损伤的影响,即随着系统健康状态的改变,其鲁棒性及其抵抗冲击的能力会发生变化。退化状态不同,随机冲击带给系统的影响也不同:当系统处于相对健康的状态下,同样强度的随机冲击对系统的影响会小于系统退化到一定程度的状态。目前已经发表的退化与冲击模型,均忽略不同的系统状态对随机冲击带给退化过程损伤的影响,这将高估系统可靠性,错误地指导维修及替换,造成严重的经济损失。

一些学者注意到系统状态可能会对退化过程产生影响,因此在退化模型的研究中,提出了基于时间和状态的退化模型<sup>[19-24]</sup>。这些研究表明当前退化状态会影响系统整体退化过程。然而这些基于时间和状态的退化模型并未考虑随机冲击的影响,在实际的工业生产中,随机冲击涉及到环境的突变、过载、短路或断路等情况,通常很难消除,因此其带来的影响不容忽视。

综上所述,在建立退化模型评估系统可靠性的过程中,考虑系统当前退化状态以及随机冲击对系统的影响具有重要的研究意义。因此,基于通用退化路径,提出一种时间状态相关的退化与冲击模型:该模型考虑当前状态对冲击带给退化过程的损伤所造成的影响,具体体现为不同健康状态下,随机冲击带给系统退化进程的影响相应改变,用与当前状态相关的状态函数表示。文章将提出的模型与现存应用较为广泛的时间相关退化与冲击模型进行对比,并将原模型从线性退化路径扩展到通用退化路径。结果表明:提出的时间与状态相关的退化与冲击模型更具有一般性,应用更为广泛。此外,不考虑当前状态的退化与冲击模型会过高地估计系统可靠性。

## 1 退化模型的构建

本研究针对工作环境复杂的电气、机械系统,以风电设备的工作过程为例,引入提出模型的具体形式及构建模型的假设,但该模型的应用不局限于风电设备。

风电设备在野外工作中,随着服役周期的增长,其自身会发生特定的退化如老化,磨损等。此外,由于设备暴露于野外工作环境,可能遭受到来自环境中的随机冲击,如暴雨、冰雹等,这些冲击会加快系统的老化进程,即带给退化过程一定的增量。此外,风电设备还可能遭遇较大的随机冲击如地震等,当地震强度超过一定阈值时会导致设备整体瘫痪。然而,同样的冲击带给同一地点设备组的影响存在一定程度上的差异性,例如地震发生时,某些设备会出现倾覆,彻底丧失功能,某些设备则部分

受损, 仍然可正常运转。冲击带来影响的差异性, 不仅与设备的使用年限有关, 还受到设备当前健康状态的影响。

### 1.1 系统描述与假设

本文对研究的系统特征做出以下描述和假设。

(1) 系统遭受退化过程和随机冲击过程, 随机冲击分为两类: 自身尺寸超过某特定阈值  $D$  的致命冲击会导致系统即刻失效; 不超过阈值  $D$  的非致命冲击会给系统带来退化增量。

(2) 系统失效模式包括致命冲击引发的硬失效, 以及非致命冲击和系统自身退化综合效应超过特定阈值  $H$  引发的软失效。

(3) 随机冲击的到达服从发生率为  $\lambda$  的泊松过程  $\{N(t), t \geq 0\}$ 。非致命冲击数量用  $N_1(t)$  表示, 其到达率为  $\lambda p$ , 致命冲击数量用  $N_2(t)$  表示, 其到达率为  $\lambda(1-p)$ 。根据文献[25]可知, 致命冲击过程与非致命冲击过程相互独立。随机变量  $W_i (i=1,2,3,\dots)$  表示第  $i$  个冲击自身的尺寸, 即冲击自身强度,  $Y_i (i=1,2,3,\dots)$  表示第  $i$  个随机冲击带给系统的损伤, 也为服从特定分布的随机变量。

(4) 系统自身退化过程  $X(t)$  用通用退化路径模型表示, 即  $X(t)=\beta \times \eta(t)$ , 其中  $\beta$  为服从特定分布的随机变量,  $\eta(t)$  表示退化路径。

(5) 随机冲击对系统的影响, 与系统当前的退化状态相关, 用与状态有关的状态函数表示。

以上假设中, (1)~(3) 三条为退化与冲击模型常用假设, 具体参考文献[15-16, 18, 20], 假设(4)、(5) 为针对本研究的创新点所作假设。

### 1.2 时间和状态相关的退化与冲击模型

文献[18]中提出的基于线性退化路径的时间相关退化与冲击模型表示如式(1)所示

$$M(t) = X(t) + \sum_{i=1}^{N_1(t)} Y_i \quad (1)$$

式中,  $N_1(t)$  表示截止到时间  $t$  非致命冲击的数量,  $Y_i (i=1,2,3,\dots)$  表示第  $i$  个冲击给退化过程带来的增量;  $X(t)$  表示系统自然退化路径, 在文献[18]中用线性方程表示

$$X(t) = \beta \cdot t + \varphi \quad (2)$$

式中,  $\varphi$  为常量, 表示初始退化量,  $\beta$  为服从特定分布的随机变量, 该模型中,  $\beta \sim N(\mu_\beta, \sigma_\beta^2)$ 。另外,  $Y_i \sim N(\mu_Y, \sigma_Y^2)$ , 即随机冲击给系统带来的退化增量(即损伤)服从参数为  $\mu_Y$  和  $\sigma_Y$  的正态分布。冲击自身强度  $W_i (i=1,2,3,\dots)$  也服从正态分布  $W_i \sim N(\mu_W, \sigma_W^2)$ 。

然而, 该模型并未考虑当前退化状态对冲击带

来损伤的影响。由第 1.1 节分析可知: 当系统处于相对健康的状态时, 同样强度和数量的随机冲击对系统产生的影响要小于系统状态较差时的影响, 即随机冲击对系统产生的损伤与系统当前状态有关。

因此, 提出一种基于通用退化路径的时间和状态相关退化与冲击模型, 该模型将线性退化路径扩展为通用退化路径, 并将当前状态作为影响因子纳入模型构建中, 提升了模型的适用性。该模型具体形式如下

$$M(t) = \beta \cdot \eta(t) + r(M(t)) \sum_{i=1}^{N_1(t)} Y_i \quad (3)$$

式中,  $r(M(t))$  表示以当前状态为自变量的函数,  $\beta$  为随机变量, 表示各系统或部件之间的差异性, 具体分布依具体问题而定。 $\eta(t)$  表示通用退化路径模型, 不局限于线性形式。 $N_1(t)$  表示截止到时间  $t$  非致命冲击数量,  $Y_i (i=1, 2, \dots, \infty)$  表示第  $i$  个冲击带给退化过程的退化增量。当  $r(M(t))$  为线性状态函数的情况下, 可得出该模型的解析形式

$$r(M(t)) = aM(t) + b \quad (4)$$

$$M(t) = \frac{\beta \cdot \eta(t) + b \sum_{i=1}^{N_1(t)} Y_i}{1 - a \sum_{i=1}^{N_1(t)} Y_i} \quad (5)$$

式中,  $a$  和  $b$  为任意非负值, 根据需解决的实际问题来确定取值。若  $a=0, b=1$ , 且  $\eta(t)=t$ , 该模型退化为文献[18]中的模型, 即当前状态与冲击对系统退化影响无关。因此该模型更具有-般性, 可将时间相关退化模型视为特例。模型构建过程考虑了系统当前状态, 因此更加完善, 但在一定程度上增加了建模难度。

## 2 可靠性估计

本节基于提出的时间状态相关退化与冲击模型, 推导出可靠度函数及失效时间分布函数的解析表达式。由于系统经历退化过程与冲击过程, 因此当退化总量不超过阈值  $H$  且单个冲击强度不超过其特定阈值  $D$  时, 可得可靠度如下

$$R(t) = P(M(t) \leq H | N(t) = 0) \cdot P(N(t) = 0) + \sum_{n=1}^{\infty} P(M(t) \leq H | N_1(t) = n) \cdot P(N_1(t) = n) \quad (6)$$

式中,  $M(t)$  为系统总体退化量。根据全概率公式, 该可靠性计算分为两部分: 当冲击数量为 0 (包括致命冲击和非致命冲击) 时, 以及非致命冲击为  $n$

( $n=1,2,\dots$ )时, 由此推导出可靠度函数表达式如下

$$\begin{aligned}
 R(t) &= P(M(t) \leq H | N(t) = 0) \cdot P(N(t) = 0) + \\
 &\sum_{n=1}^{\infty} P(M(t) \leq H | N_1(t) = n) \cdot P(N_1(t) = n) = \\
 &P(\beta \cdot \eta(t) \leq H) \cdot P(N(t) = 0) + \\
 &\sum_{n=1}^{\infty} P(M(t) \leq H | N_1(t) = n) \cdot P(N_1(t) = n) \times \\
 &P(W_i \leq D)^n = \exp(-\lambda t) \cdot F_{\beta} \left( \frac{H}{\eta(t)} \right) + \\
 &\sum_{n=1}^{\infty} F_W(D)^n \cdot P \left( \frac{\beta \cdot \eta(t) + b \sum_{i=1}^{N_1(t)} Y_i}{1 - a \sum_{i=1}^{N_1(t)} Y_i} \leq H \right) \cdot P(N_1(t) = n) = \\
 &\exp(-\lambda t) \cdot F_{\beta} \left( \frac{H}{\eta(t)} \right) + \\
 &\sum_{n=1}^{\infty} F_W(D)^n \frac{\exp(-\lambda t)(\lambda t)^n}{n!} \times \\
 &\int_{z=0}^H F_{\beta} \left( \frac{H \cdot (1 - a \cdot z) - b \cdot z}{\eta(t)} \right) dQ^{(n)}(z) \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中,  $F_{\beta}(\cdot)$  为退化模型中随机变量  $\beta$  的累计概率分布函数,  $W_i$  为随机冲击自身强度,  $D$  为其强度阈值,  $Q(z)$  为单个冲击造成损伤, 即退化增量  $Y_i$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) 的分布函数,  $F_W(\cdot)$  表示随机冲击自身尺寸的分布函数。若  $f_{\beta}(\cdot)$  表示随机变量  $\beta$  的概率密度函数,  $\eta'(t)$  表示通用退化路径  $\eta(t)$  的导数, 可得失效时间分布函数如下

$$\begin{aligned}
 f(t) &= -\frac{dR(t)}{dt} = \\
 &\lambda \exp(-\lambda t) F_{\beta} \left( \frac{H}{\eta(t)} \right) + \\
 &\frac{H \eta'(t)}{\eta^2(t)} \exp(-\lambda t) f_{\beta} \left( \frac{H}{\eta(t)} \right) - \\
 &\sum_{n=1}^{\infty} F_W(D)^n \frac{\lambda \exp(-\lambda t)(\lambda t)^{n-1} (-\lambda t + n)}{n!} \times \\
 &\int_{z=0}^H F_{\beta} \left( \frac{H \cdot (1 - a \cdot z) - b \cdot z}{\eta(t)} \right) dQ^{(n)}(z) - \\
 &\sum_{n=1}^{\infty} F_W(D)^n \frac{\exp(-\lambda t)(\lambda t)^n}{n!} \times \\
 &\left( -\frac{(H \cdot (1 - a \cdot z) - b \cdot z) \eta'(t)}{\eta^2(t)} \right) \times \\
 &\int_{z=0}^H f_{\beta} \left( \frac{H \cdot (1 - a \cdot z) - b \cdot z}{\eta(t)} \right) dQ^{(n)}(z) \quad (8)
 \end{aligned}$$

### 3 案例分析

为了验证提出的时间和状态相关的退化与冲击模型的有效性及其合理性, 本节首先采用数值分析案例进行验证, 该数值分析案例来自文献[17]中基于时间的退化与冲击模型的验证分析, 并且模型为非线性退化路径。案例二将该模型与目前应用较为广泛的时间相关退化与冲击模型[18]进行对比, 模型参数源于 Sandia 国家实验室关于微机电系统(MEMS)中微驱动装置的线性磨损过程的研究数据[26]。

#### 3.1 数值分析案例

假设某系统经历退化与冲击过程, 系统自身退化路径如下[17]

$$X(t) = \theta_2 \ln(t + \theta_1) \quad (9)$$

式中,  $\theta_1=4.8$ ,  $\theta_2$  为服从参数  $c=50$ ,  $d=0.01$  的 Gamma 分布的随机变量, 其概率密度函数为

$$f(x) = x^{c-1} \exp[-(x/d)] / d^c \Gamma(c) \quad (10)$$

冲击的到达服从到达率  $\lambda=1/15$  的泊松过程, 且随机冲击为非致命冲击的概率为  $p(t)=\exp(-\theta t)$ ,  $\theta=0.0002$ , 软失效过程的阈值  $H=3.5$ , 单个冲击带来的损伤服从均值  $v=0.1$  的指数分布。这些参数的设定与文献[17]均保持一致。根据提出的考虑时间与当前状态的模型, 假设  $r(M(t))=0.8 \times M(t)+1$ ,  $a=0.9$ ,  $b=0.85$ , 结合第2节推导出的可靠度函数表达式(7)与该数值案例中退化路径模型(9), 可以获得可靠度对比曲线如下。

图1中实线为基于时间的退化与冲击模型所得可靠度曲线, 虚线为根据提出的时间与状态相关退化与冲击模型获取的可靠度曲线。由图1得知, 考虑将当前状态作为影响因子, 纳入冲击对退化过程产生的损伤时, 获取的可靠性评估结果会低于仅考虑时间的退化与冲击模型。由于系统抵抗冲击的能

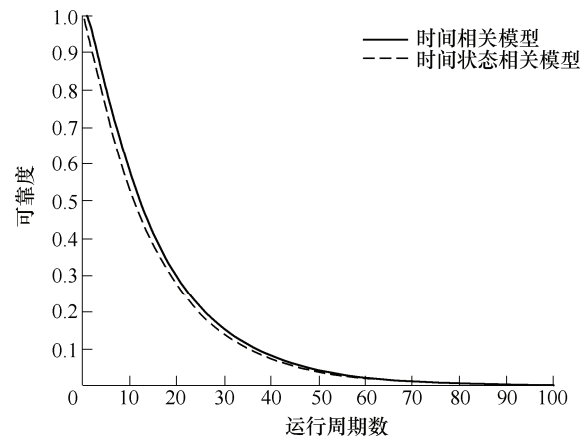


图1 基于原时间模型和提出的模型的可靠度曲线

力会随系统健康状态的退化而降低,忽略当前状态的影响会高估系统的可靠性,因此该数值案例能够很好地验证提出模型的准确性。

### 3.2 MEMS 微驱动磨损过程研究

由于实际工业生产中随机冲击数据量化困难,并且实际获取的退化量通常已经夹杂着随机冲击,因此很难将系统自身退化与来自环境中的随机冲击剥离。因此,为了验证提出的时间与状态相关的退化与冲击模型的可行性与合理性,本节采用 Sandia 国家实验室关于 MEMS 中微驱动装置线性磨损过程的冲击测试试验数据<sup>[26]</sup>进行分析验证。微驱动装置由机械连接到旋转齿轮上的一组正交线性梳状驱动器组成,如图 2 所示,通电后梳状驱动器的线性位移转换成圆周运动。其中,齿轮与枢接处的磨损为主要失效模式(自然退化过程),试验中加诸微驱动装置的冲击测试结果显示随机冲击会导致齿轮与枢接、弹簧处产生大量的磨损。

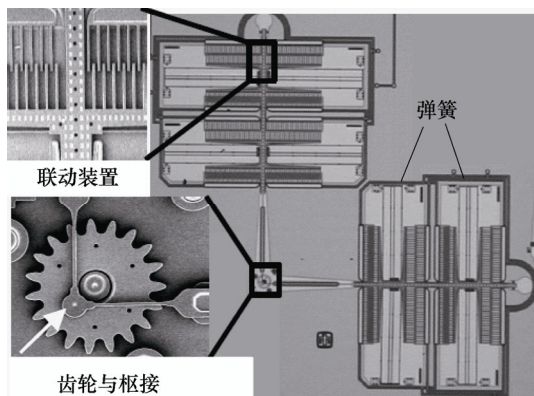


图 2 微驱动装置平面图

通过量化磨损的体积与运行周期数之间的函数关系可获得退化模型具体形式。已知枢接半径为  $\gamma$ ,与磨损和材料硬度相关的系数为  $c$ ,接触面之间的力用  $F$  表示,通过结合工作原理及其失效物理机制,可以获取磨损过程的模型为<sup>[26]</sup>

$$X(t; \gamma, c, F) = 2\pi\gamma c F t \quad (11)$$

式中,  $c$  与磨损系数呈正比,与材料硬度呈反比,枢接半径  $\gamma$  为服从正态分布的随机变量,当驱动信号为正弦波时,  $F$  同样为服从正态分布的随机变量。因此,磨损过程可采用线性退化路径表示,见式(2),具体推导过程和试验介绍见文献[18, 26]。由该模型获取的可靠度函数

$$R(t) = \Phi\left(\frac{H - \mu_\beta t - \varphi}{\sigma_\beta t}\right) \exp(-\lambda t) + \sum_{n=1}^{\infty} F_W(D) \times \Phi\left(\frac{H - (\mu_\beta t + \varphi + n\mu_Y)}{\sqrt{\sigma_\beta^2 t^2 + n\sigma_Y^2}}\right) \times$$

$$\frac{\exp(-\lambda t)(\lambda t)^n}{n!} \quad (12)$$

式中,  $H$  为退化总量的阈值,  $D$  为随机冲击自身强度  $W_i (i=1,2,3,\dots)$  阈值,且  $W_i \sim N(\mu_W, \sigma_W^2)$ ;  $\lambda$  为服从泊松过程的随机冲击的到达率,  $\varphi$  表示磨损过程的初始值,该例中  $\varphi=0$ 。磨损过程的磨损率  $\beta$  服从均值为  $\mu_\beta$ , 方差为  $\sigma_\beta^2$  的正态分布,单个随机冲击对磨损过程损伤的累积效应  $Y_i (i=1,2,3,\dots)$  服从参数为  $\mu_Y, \sigma_Y^2$  的正态分布,具体参数值如表 1 所示<sup>[18]</sup>。

表 1 MEMS 可靠性研究的各参数具体值

参数名称	具体数值	来源
软失效阈值 $H/\mu\text{m}^3$	0.001 25	文献[26]
冲击强度阈值 $D/\text{GPa}$	1.5	文献[26]
退化初始值 $\varphi/\mu\text{m}^3$	0	文献[26]
磨损率 $\beta/\mu\text{m}^3$	$\sim N(\mu_\beta, \sigma_\beta^2)$ $\mu_\beta=8.482\ 3\times 10^{-9}$ $\sigma_\beta=6.001\ 6\times 10^{-10}$	文献[26]
冲击到达率 $\lambda$	$2.5\times 10^{-5}$	假设值
冲击损伤 $Y_i/\mu\text{m}^3$	$\sim N(\mu_Y, \sigma_Y^2), i=1,2,\dots,\infty$ $\mu_Y=1\times 10^{-4}$ $\sigma_Y=2\times 10^{-5}$	假设值
冲击强度 $W_i/\text{GPa}$	$\sim N(\mu_W, \sigma_W^2), i=1,2,\dots,\infty$ $\mu_W=1.2$ $\sigma_W=0.2$	假设值

结合提出的时间状态相关模型,假设状态函数表达式为  $r(M(t))=0.8M(t)+1$ ,即  $a=0.8, b=1$ ,其他参数与表 1 一致,将其代入式(7)、(8),可得出基于原时间相关模型及提出的时间状态相关模型的可靠度分布曲线以及失效时间曲线,如图 3、4 所示。

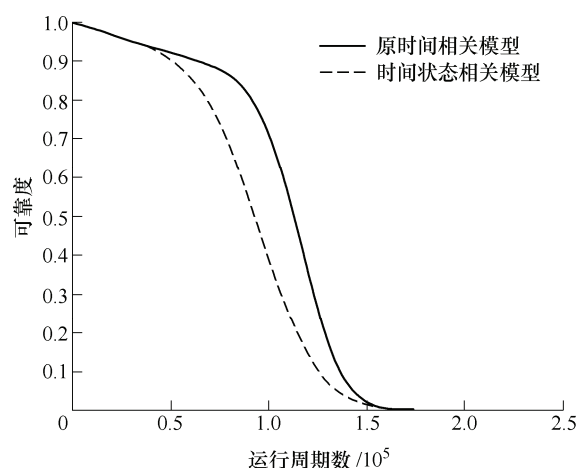


图 3 基于原时间模型和提出的模型的可靠性曲线

由图 3、4 可以看出,在大约  $0.4\times 10^5$  工作周期之前,基于时间和状态退化与冲击模型获得的可靠度与基于时间的退化与冲击模型获得的可靠度几乎重合,在该时间以后基于时间和状态相关模型获得的可靠度比基于时间相关退化模型得到的可靠度



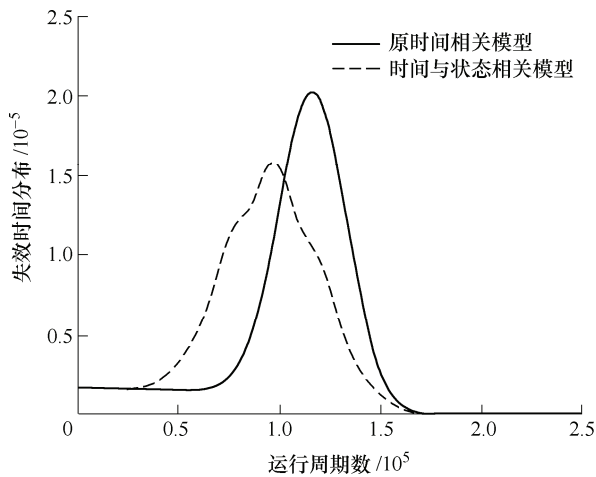


图4 失效时间分布曲线

低。在大约  $1.6 \times 10^5$  工作周期后, 可靠度趋于 0。这与本文的假设相吻合: 仅考虑时间的退化模型在系统健康状态相对较差的情况下会高估系统的可靠性。由于系统自身的鲁棒性以及抵御冲击的能力随着其自身退化而降低, 当系统处于接近失效的状态下, 非致命冲击也可能带来严重后果。因此, 对退化过程与冲击过程并存的系统进行建模时, 考虑到系统当前状态对随机冲击带来损伤的影响, 能够提高基于该模型获取的可靠度评估结果的准确性, 为后续维修与替换工作及时有效地开展奠定基础。

## 4 结论

(1) 在时间相关的退化与冲击模型基础上, 提出一种基于时间和状态的退化与冲击模型。模型将线性退化路径扩展到通用退化路径, 极大地提高了模型的适用性。

(2) 考虑不同状态下, 随机冲击对系统造成的影响不同, 将当前的状态作为影响因子, 纳入随机冲击带给退化过程的损伤, 用与当前状态相关的状态函数表示, 并推导出可靠度函数的解析表达式以及失效时间分布函数的解析表达式。

(3) 不考虑系统状态的退化与冲击模型, 相较于同时考虑时间和当前状态的退化与冲击模型, 在系统退化到一定程度时, 会高估系统可靠性, 导致维护及替换措施不及时, 从而带来不必要的经济损失。在工程应用中, 基于考虑时间和状态的退化与冲击模型获取的可靠度评估结果更加准确合理, 切合实际。本研究结果对于机械系统设计初期的可靠性分配以及运行过程的维护具有极强的指导意义和参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] 胡姚刚, 李辉, 廖兴林, 等. 风电轴承性能退化建模及其实时剩余寿命预测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1643-1649.  
HU Yaogang, LI Hui, LIAO Xinglin, et al. Performance degradation model and prediction method of real-time remaining useful life for wind turbine bearings[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1643-1649.
- [2] 潘骏, 王小云, 陈文华, 等. 基于多元性能参数的加速退化试验方案优化设计研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 30-35.  
PAN Jun, WANG Xiaoyun, CHEN Wenhua, et al. Research on optimal design of accelerated degradation test plan based on multiple performance parameters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 30-35.
- [3] 冯玓, 林圣, 张奥, 等. 基于连续时间马尔可夫退化过程的牵引供电设备可靠性预测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1937-1946.  
FENG Ding, LIN Sheng, ZHANG Ao, et al. Research on reliability prediction method for traction power supply equipment based on continuous time Markov degradation process[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1937-1946.
- [4] LI W, PHAM H. Reliability modeling of multi-state degraded systems with multi-competing failures and random shocks[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2): 297-303.
- [5] 李铭, 谢里阳, 张宇, 等. 齿轮的概率寿命预测与弯曲疲劳试验[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 169-175.  
LI Ming, XIE Liyang, ZHANG Yu, et al. Probabilistic life prediction and bending fatigue test for gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 169-175.
- [6] 王世娇, 陈文华, 钱萍, 等. 航天电连接器的可靠性设计建模[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 180-186.  
WANG Shijiao, CHEN Wenhua, QIAN Ping, et al. Reliability design model of aerospace electrical connector[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(10): 180-186.
- [7] LI W, PHAM H. An inspection-maintenance model for systems with multiple competing processes[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2): 318-327.
- [8] WANG G, ZHANG Y. A shock model with two-type failures and optimal replacement policy[J]. International Journal of Systems Science, 2005, 36(4): 209-214.
- [9] HUANG W, ASKIN R G. Reliability analysis of electronic devices with multiple competing failure modes involving performance aging degradation[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2003, 19(3):

- 241-254.
- [10] KHAROUFEH J P, FINKELSTEIN D E, MIXON D G. Availability of periodically inspected systems with Markovian wear and shock[J]. Journal of Applied Probability, 2006, 43: 303-317.
- [11] KLUTKE G A, YANG Y. The availability of inspected systems subject to shocks and graceful degradation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2002, 51(3): 371-374.
- [12] CHA J H, FINKELSTEIN M. On a terminating shock process with independent wear increments[J]. Journal of Applied Probability, 2009, 46(2): 353-362.
- [13] LI Y, ZIO E, LIN Y. A multistate physics model of component degradation based on stochastic petri nets and simulation[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(4): 921-931.
- [14] LIN Y, LI Y, ZIO E, et al. Integrating random shocks into multi-state physics models of degradation processes for component reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(1): 154-166.
- [15] SONG S, COIT D W, FENG Q. Reliability for systems of degrading components with distinct component shock set[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 132: 115-124.
- [16] JIANG L, FENG Q, COIT D W. Modeling zoned shock effects on stochastic degradation in dependent failure processes[J]. IIE Transactions, 2015, 47(5): 460-470.
- [17] WANG Y, PHAM H. Modeling the dependent competing risks with multiple degradation processes and random shock using time-varying copulas[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(1): 13-22.
- [18] PENG H, FENG Q, COIT D W. Reliability and maintenance modeling for systems subject to multiple dependent competing failure processes[J]. IIE Transactions, 2011, 43(1): 12-22.
- [19] GIORGIO M, GUIDA M, PULCINI G. A state-dependent wear model with an application to marine engine cylinder liners[J]. Technometrics, 2010, 52(2): 172-187.
- [20] GIORGIO M, GUIDA M, PULCINI G. An age- and state-dependent Markov model for degradation processes[J]. IIE Transactions, 2011, 43(9): 621-632.
- [21] GUIDA M, PULCINI G. A continuous-state Markov model for age- and state dependent degradation processes[J]. Structure Safety, 2011, 33(6): 354-366.
- [22] GIORGIO M, GUIDA M, PULCINI G. A new class of Markovian processes for deteriorating units with state dependent increments and covariates[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(2): 562-578.
- [23] ZHANG Z, SI X, HU C. An age- and state-dependent nonlinear prognostic model for degrading systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2015, 64(4): 1-15.
- [24] SI X, WANG W, HU C, et al. Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(1): 50-67.
- [25] ROSS S M. Introduction to probability models[M]. San Diego: Tenth Edition, Academic Press. Inc. 2011.
- [26] TANNER D M, DUGGER M T. Wear mechanisms in a reliability methodology[C]// Proceedings of the SPIE-the International Society for Optical Engineering. San Jose: Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS II, 2003, 22-40.

作者简介: 王嘉, 女, 1988 年出生, 博士。主要研究方向为退化建模及可靠性评估。

E-mail: jwangno1@163.com

张露予(通信作者), 女, 1989 年出生, 博士。主要研究方向为工业机器人故障诊断及可靠性预测。

E-mail: zhangluyu2011@163.com

陶友瑞, 男, 1973 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为复杂系统可靠性分析方法。

E-mail: taoyourui@hebut.edu.cn

李志刚, 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为可靠性试验与检测技术。

E-mail: zgli@hebut.edu.cn