

# 控制与决策

Control and Decision

## 双不确定相依竞争失效模型的可靠性评估

师海燕, 魏淳, 张志强, 刘宝亮, 温艳清, 肖海燕

引用本文:

师海燕, 魏淳, 张志强, 等. 双不确定相依竞争失效模型的可靠性评估[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 685–689.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1487>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

*控制与决策*. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

### 基于无标签、不均衡、初值不确定数据的设备健康评估方法

Equipment health risk assessment based on unlabeled, unbalanced data under uncertain initial condition

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2687–2695 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1493>

### 车辆跟随控制策略的状态可达集建模及验证方法

A modeling and verification method of state reachable set for vehicle following control strategy

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1679–1685 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1562>

### 不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法

Large-scale group DEMATEL decision making method under uncertain linguistic information

*控制与决策*. 2021, 36(8): 2023–2033 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1486>

### 考虑气动效应不确定性的气动辅助变轨制导算法

Aeroassisted orbital transfer robust guidance method considering atmosphere effect uncertainty

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2773–2779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0333>

# 双不确定相依竞争失效模型的可靠性评估

师海燕<sup>1</sup>, 魏 淳<sup>2</sup>, 张志强<sup>1</sup>, 刘宝亮<sup>1†</sup>, 温艳清<sup>1</sup>, 肖海燕<sup>1</sup>

(1. 山西大同大学 数学与统计学院, 山西 大同 037009;

2. 山西大同大学 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

**摘要:** 复杂设备常会经历自然磨损和外力影响, 外力致使磨损量突然增大. 在工程实践中, 很多高可靠性、长寿命的设备, 由于不易获得足量的失效数据, 须使用专家的经验数据来评估设备的寿命分布和可靠性指标. 然而, 专家的经验数据往往不是精确的常数, 而是一个限定范围. 为了处理这种人为认知引起的不确定性, 引入不确定理论, 用不确定变量刻画专家的经验数据, 同时分布函数中的参数也具有不确定性, 并用不确定变量描述. 在参数为不确定变量情形下, 利用不确定理论的方法计算. 设备经历了相依竞争失效过程的确信可靠度, 系统的确信可靠度高于参数为常数的情形, 并用微电子机械系统为例验证了模型的有效性.

**关键词:** 可靠性; 相依竞争失效过程; 不确定理论; 不确定变量; 不确定分布

中图分类号: O213; O211.62

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1487

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 师海燕, 魏淳, 张志强, 等. 双不确定相依竞争失效模型的可靠性评估[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 685-689.

## Reliability evaluation of dependent competitive failure models with bi-uncertainty

SHI Hai-yan<sup>1</sup>, WEI Chun<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>1</sup>, LIU Bao-liang<sup>1†</sup>, WEN Yan-qing<sup>1</sup>, XIAO Hai-yan<sup>1</sup>

(1. College of Mathematics and Statistics Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China; 2. College of Physics and Electronics Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

**Abstract:** Complex equipments often experience natural wear and external forces, and external forces cause a sudden increase in wear. In engineering practice, many high-reliability and long-lifetime equipments can not obtain a sufficient amount of failure data easily, it is necessary to use expert experience data to evaluate equipment's lifetime distribution and reliability indicators. However, the empirical data of experts is often not an exact constant, but a limited range. In order to deal with the uncertainty caused by human cognition, the uncertainty theory is introduced, and the empirical data of experts is described by uncertain variables. At the same time, the parameters in the distribution function are also uncertain and described by uncertain variables. The uncertainty theory is used to calculate the belief reliability of the equipment undergoing dependent competition failure process. When the parameters are uncertain variables, the belief reliability of the system is higher than that when the parameters are constant, The microelectronic mechanical system is used as an example to verify the effectiveness of the proposed model.

**Keywords:** reliability; dependent competing failure process; uncertainty theory; uncertain variable; uncertainty distribution

## 0 引言

在工程实践中, 复杂设备由很多元件组成, 元件的性能会影响设备的可靠性. 元件一旦损坏, 维修时间长、成本高, 替换费用不菲, 因此, 对于复杂设备的可靠性评估就显得尤为重要.

设备的性能会随时间发生退化, 比如电容器随贮存时间电容量发生变化<sup>[1]</sup>, 液力耦合器的退化随时间呈现多阶段特征<sup>[2]</sup>; 设备除了元件间的磨损老化导致

损坏, 同时也可能遭受不可抵抗的外力影响, 比如高压、强电流、地震、强风等. 这些外力不仅使得设备的退化加快, 甚至导致设备的损坏. 这样的失效过程, 称为相依竞争失效过程. 目前已经有学者对此进行了研究, Peng 等<sup>[3]</sup>对一个多重相依竞争失效过程的可靠性进行了研究, 通过最小化平均维护成本率, 制定了定期检查的预防性保养维修策略. Jiang 等<sup>[4]</sup>在文献[3]的基础上, 根据冲击对设备造成的损坏大小将

收稿日期: 2020-10-28; 录用日期: 2021-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(71601101); 山西省高等学校科技创新项目(2020L0463, 2019L0738).

责任编辑: 刘宝璇.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: baoliang521@163.com.

冲击分成了3类:安全区,损坏区和致命区冲击. Song等<sup>[5]</sup>考虑了多部件相依的竞争失效过程, Rafiee等<sup>[6]</sup>对于退化量的改变引起硬件失效的临界值降低的模型进行可靠性分析,并给出了确保设备正常运行时的维修保养策略. Wang等<sup>[7]</sup>研究了非致命冲击中年龄和状态相依的离散退化模型.

上述文章都是在概率论的框架下,拥有大量失效数据的情形下对设备进行的可靠性分析. 事实上,在航空航天等领域,很多设备都具有高可靠性、长寿命的特点,这类设备的失效数据很难获得,甚至没有<sup>[1]</sup>,其寿命分布不能通过传统的基于大样本数据的频率接近概率的方法来建模. 此时只能参考专家的经验数据来估计设备的寿命分布,而专家的经验数据往往不够精确<sup>[8]</sup>. 1965年, Zadeh<sup>[9]</sup>提出模糊集理论,可以刻画有认知不确定性的专家数据,但是模糊理论不满足排中率<sup>[8]</sup>. 为了准确地评估设备的寿命分布,考虑到主体的认知不确定性,引入不确定理论,用不确定变量描述专家的经验数据. 其不确定分布中的参数具有不确定性<sup>[10]</sup>,也用不确定变量描述,在此双重不确定情形下评估设备的可靠性. 不确定理论是 Liu<sup>[11]</sup>在2007年首次提出,并在2010年完善<sup>[12]</sup>. 经过10多年的发展,不确定理论已经变成一个与概率论相平行的数学分支,并广泛应用在系统可靠性评估<sup>[13-14]</sup>、期权定价<sup>[15]</sup>、股票价格<sup>[16]</sup>、运输问题<sup>[17]</sup>、投资组合<sup>[18]</sup>、统计建模<sup>[19-20]</sup>等.

Cao等<sup>[21]</sup>在2019年提出在离散状态下有不确定参数的冗余系统, Liu等<sup>[22]</sup>给出了在一般串、并联系统中双重不确定变量的定义. 在竞争失效模型中尚没有学者用双重不确定变量来描述元件的寿命. 因此,本文考虑在自然磨损和外力影响下的竞争失效模型,用不确定线性退化过程描述自然磨损,用一个不确定更新过程来刻画外力的到达,与此同时也考虑了外力使磨损量在瞬间剧增的情况. 自然磨损量、外力的大小、外力的到达都看作不确定变量,其分布函数中的参数也是不确定变量. 在此前提下,用不确定理论评估设备的确信可靠度<sup>[23]</sup>.

## 1 相依竞争失效过程建模

### 1.1 外力引起的失效模型

在传统的可靠性模型中,外力的到达采用一个随机更新过程来刻画. 事实上,外力的到达有很多不确定性,在有足量失效数据时可用随机过程描述,在数据少的情形只能依据专家的经验数据来评估外力的到达,专家的经验数据具有主观性和区间性,而且经验分布与频率不相符. 此时考虑用不确定理论的更新过程来描述更合适.

若累积外力的大小超过阈值  $L$ , 则设备故障. 假

设  $N(t)$  是到  $t$  时刻为止外力到达的次数, 外力的到达间隔是一个非负不确定变量  $Y_i$ ,  $Y_i$  是第  $i - 1$  次外力与第  $i$  次外力到达的时间间隔,  $Y_1, Y_2, \dots$  是相互独立同分布的不确定变量, 其分布函数为  $F(x; y_1, y_2, \dots, y_{n_1})$ , 其中参数  $y_i (i = 1, 2, \dots, n_1)$  是不确定变量, 分布函数为  $f_i(x; y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ip_i})$ , 参数  $y_{ij} (i = 1, 2, \dots, n_1, j = 1, 2, \dots, p_i)$  是常数. 假设  $F(x; y_1, y_2, \dots, y_{n_1})$  关于  $y_1, y_2, \dots, y_m (m < n_1)$  严格递增, 关于  $y_{m+1}, y_{m+2}, \dots, y_{n_1}$  严格递减.

假设每次外力对设备的损坏量大小是一个非负不确定变量  $Z_i$ ,  $Z_1, Z_2, \dots$  是相互独立同分布的不确定变量, 其分布函数为  $G(x; z_1, z_2, \dots, z_{n_2})$ , 其中参数  $z_i (i = 1, 2, \dots, n_2)$  是不确定变量, 分布函数为  $g_i(x; z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ip_i})$ , 参数  $z_{ij} (i = 1, 2, \dots, n_2, j = 1, 2, \dots, p_i)$  是常数. 假设  $G(x; z_1, z_2, \dots, z_{n_2})$  关于  $z_1, z_2, \dots, z_m (m < n_2)$  严格递增, 关于  $z_{m+1}, z_{m+2}, \dots, z_{n_2}$  严格递减.

下面从不确定空间的角度给出双重不确定变量的定义.

**定义1** 假设  $(\Gamma_k, L_k, M_k) (k = 0, 1, \dots, n)$  是不确定空间,  $(\Gamma, L, M)$  是  $n$  个不确定空间  $(\Gamma_k, L_k, M_k) (k = 0, 1, \dots, n)$  的乘积空间, 如果  $\xi(\gamma|\varphi(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n))$  是从不确定空间  $(\Gamma, L, M)$  到  $n + 1$  维实空间  $R^{n+1} (R$  是实数集) 的一个可测函数, 其中  $\varphi(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  是  $\xi$  的分布函数, 则称  $\xi$  是一个双重不确定变量.

**定理1** 假设  $\xi$  是定义在不确定空间  $(\Gamma, L, M)$  上的一个双重不确定变量, 对于任意实数  $x, M\{\xi(\gamma) \leq x\}$  仍然是一个不确定变量. 假设  $\xi$  的分布函数为  $\varphi(x; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ , 其中参数  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  为不确定变量, 且  $\varphi(x; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  关于  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$  严格递增, 关于  $\lambda_{p+1}, \lambda_{p+2}, \dots, \lambda_n$  严格递减, 则有

$$M\{\xi \leq x\} = \int_0^1 \varphi(x; \Lambda_1^{-1}(\alpha), \dots, \Lambda_p^{-1}(\alpha), \Lambda_{p+1}^{-1}(1 - \alpha), \dots, \Lambda_n^{-1}(1 - \alpha)) d\alpha. \quad (1)$$

**证明** 假设  $\xi$  是一个部件的寿命, 根据文献 [22] 定理5, 有

$$R(x) = \int_0^1 (1 - \varphi(x; \Lambda_1^{-1}(\alpha), \dots, \Lambda_p^{-1}(\alpha), \Lambda_{p+1}^{-1}(1 - \alpha), \dots, \Lambda_n^{-1}(1 - \alpha))) d\alpha. \quad (2)$$

所以

$$M\{\xi \leq x\} = 1 - M\{\xi > x\} = 1 - R(x) = \int_0^1 \varphi(x; \Lambda_1^{-1}(\alpha), \dots, \Lambda_p^{-1}(\alpha), \Lambda_{p+1}^{-1}(1 - \alpha), \dots, \Lambda_n^{-1}(1 - \alpha)) d\alpha. \quad (3)$$

定理得证.  $\square$

根据定理1, 有

$$M\{Y_i \leq x\} =$$

$$\int_0^1 F(x; f_1^{-1}(\alpha), \dots, f_m^{-1}(\alpha), f_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, f_{n_1}^{-1}(1-\alpha))d\alpha. \quad (4)$$

为了描述方便,式(4)中等号右边定义为 $\Delta_1(x)$ ,即 $M\{Y_i \leq x\} \triangleq \Delta_1(x)$ ,下文中式(5)~(7),(13),(14)同理.

$$M\{Z_i \leq x\} = \int_0^1 G(x; g_1^{-1}(\alpha), \dots, g_m^{-1}(\alpha), g_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, g_{n_2}^{-1}(1-\alpha))d\alpha \triangleq \Delta_2(x). \quad (5)$$

**1.2 由磨损和外力引起的退化模型**

在工程实践中,外力往往会对退化产生影响,一次外力会加剧设备的磨损.设备的退化 $S(t)$ 由两部分组成:自然磨损 $X(t) = a + bt$ 和外力引起的磨损剧增 $Z(t)$ .假设外力引起的磨损剧增和外力的大小呈正线性关系 $Z(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} cZ_i, 0 < c < 1, N(t)$ 是一个不确定更新过程.不确定的退化过程为 $S(t) = X(t) + Z(t)$ ,总的退化量超过阈值 $K$ ,则设备故障.

$X(t) = a + bt$ 中 $a$ 和 $b$ 是不确定变量,其不确定分布函数分别为 $\gamma_a(x; a_1, a_2, \dots, a_s)$ 和 $\gamma_b(x; b_1, b_2, \dots, b_l)$ ,其中参数 $a_i (i = 1, 2, \dots, s)$ 和 $b_j (j = 1, 2, \dots, l)$ 也是不确定变量,分布函数分别为 $\gamma_{a_i}(x; a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}), \gamma_{b_j}(x; b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{js})$ . $\gamma_a(x; a_1, a_2, \dots, a_s)$ 关于 $a_1, \dots, a_m (m < s)$ 严格递增,关于 $a_{m+1}, \dots, a_s$ 严格递减. $\gamma_b(x; b_1, b_2, \dots, b_l)$ 关于 $b_1, \dots, b_m (m < l)$ 严格递增,关于 $b_{m+1}, \dots, b_l$ 严格递减.根据定理1,有

$$M\{a \leq x\} = \int_0^1 \gamma_a(x; \gamma_{a_1}^{-1}(\alpha), \dots, \gamma_{a_m}^{-1}(\alpha), \gamma_{a_{m+1}}^{-1}(1-\alpha), \dots, \gamma_{a_s}^{-1}(1-\alpha))d\alpha \triangleq \Delta_3(x). \quad (6)$$

$$M\{b \leq x\} = \int_0^1 \gamma_b(x; \gamma_{b_1}^{-1}(\alpha), \dots, \gamma_{b_m}^{-1}(\alpha), \gamma_{b_{m+1}}^{-1}(1-\alpha), \dots, \gamma_{b_l}^{-1}(1-\alpha))d\alpha \triangleq \Delta_4(x). \quad (7)$$

**2 确信可靠性分析**

一个设备的确信可靠度定义为磨损退化不会引起设备故障,同时累积外力的作用也不会让设备失效的不确定测度,即

$$R(t) = M\left\{ \sum_{i=1}^{N(t)} Z_i < L, S(t) < K \right\}. \quad (8)$$

**定理2**  $t$ 时刻设备的确信可靠度为

$$R(t) = (1 - \Delta_1(t)) \bigvee_{k \geq 1} [ \max(1 - W_t(k)) \wedge \Delta_5(L) ] \wedge \left\{ \left[ \sup_{x_1+x_2 \leq K} \Delta_3(x_1) \wedge \Delta_4\left(\frac{x_2}{t}\right) \wedge (1 - \Delta_1(t)) \right] \bigvee \left[ \sup_{x_1+x_2+x_3 \leq K} \Delta_3(x_1) \wedge \Delta_4\left(\frac{x_2}{t}\right) \wedge \Delta_5\left(\frac{x_3}{c}\right) \wedge \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. (1 - W_t(k)) \right] \right\}. \quad (9)$$

**证明**

$$R(t) = M\left\{ \sum_{i=1}^{N(t)} Z_i < L, S(t) < K \right\} = M\left\{ \sum_{i=1}^{N(t)} Z_i < L \right\} \wedge \{ S(t) < K \}. \quad (10)$$

因为不确定事件 $\left\{ \sum_{i=1}^{N(t)} Z_i < L \right\}$ 与 $\left\{ \bigcup_{k=0}^{\infty} (N(t) = k), \sum_{i=1}^k Z_i < L \right\}$ 是等价的,所以有

$$M\left\{ \sum_{i=1}^{N(t)} Z_i < L \right\} = M\left\{ \bigcup_{k=0}^{\infty} (N(t) = k), \sum_{i=1}^k Z_i < L \right\} = M\{N(t) = 0\} \bigvee \left[ \max_{k \geq 1} M\{N(t) \leq k\} \wedge M\left\{ \sum_{i=1}^k Z_i < L \right\} \right]. \quad (11)$$

根据不确定更新过程<sup>[13]</sup>,  $N(t)$ 有不确定分布

$$M\{N(t) \leq k\} = 1 - M\left\{ \sum_{i=1}^{k+1} Y_i \leq t \right\}.$$

根据不确定理论<sup>[11]</sup>,  $\sum_{i=1}^{k+1} Y_i$ 有逆不确定分布函数

$$\psi^{-1}(\alpha) = \sum_{i=1}^{k+1} F_i^{-1}(\alpha), \text{ 且 } M\left\{ \sum_{i=1}^{k+1} Y_i \leq t \right\} = \int_0^1 \psi(t; f_1^{-1}(\alpha), \dots, f_m^{-1}(\alpha), f_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, f_{(k+1)n_1}^{-1}(1-\alpha))d\alpha. \quad (12)$$

所以

$$M\{N(t) \leq k\} = 1 - \int_0^1 \psi(t; f_{11}^{-1}(\alpha), \dots, f_{1m_1}^{-1}(1-\alpha), f_{21}^{-1}(\alpha), \dots, f_{(k+1)m_{k+1}}^{-1}(1-\alpha))d\alpha \triangleq 1 - W_t(k). \quad (13)$$

同理,假设 $\sum_{i=1}^k Z_i$ 有逆不确定分布

$$\phi^{-1}(\alpha) = \sum_{i=1}^k G_i^{-1}(\alpha),$$

且

$$M\left\{ \sum_{i=1}^k Z_i \leq L \right\} = \int_0^1 \phi(L; g_1^{-1}(\alpha), \dots, g_m^{-1}(\alpha), g_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, g_{n_2}^{-1}(1-\alpha))d\alpha \triangleq \Delta_5(L). \quad (14)$$

结合式(11),(13)和(14),有

$$M\left\{\sum_{i=1}^{N(t)} Z_i < L\right\} = (1 - \Delta_1(t)) \vee [\max_{k \geq 1} (1 - W_t(k)) \wedge \Delta_5(L)]. \quad (15)$$

接下来有

$$\begin{aligned} M\{S(t) < K\} &= M\left\{a + bt + \sum_{i=1}^{N(t)} cZ_i < K\right\} = \\ &M\left\{(a + bt < K, N(t) = 0) \cup \right. \\ &\left. \left(a + bt + \sum_{i=1}^k cZ_i < K, N(t) = k\right)\right\} = \\ &\left[ \sup_{x_1+x_2 \leq K} M\{a \leq x_1\} \wedge M\left\{b \leq \frac{x_2}{t}\right\} \right] \wedge \\ &M\{N(t) = 0\} \vee \\ &\left[ \sup_{x_1+x_2+x_3 \leq K} M\{a \leq x_1\} \wedge M\left\{b \leq \frac{x_2}{t}\right\} \wedge \right. \\ &\left. \left(M\left\{\sum_{i=1}^k Z_i \leq \frac{x_3}{c}\right\} \wedge M\{N(t) \leq k\}\right) \right] = \\ &\left[ \sup_{x_1+x_2 \leq K} \Delta_3(x_1) \wedge \Delta_4\left(\frac{x_2}{t}\right) \wedge (1 - \Delta_1(t)) \right] \vee \\ &\left[ \sup_{x_1+x_2+x_3 \leq K} \Delta_3(x_1) \wedge \Delta_4\left(\frac{x_2}{t}\right) \wedge \right. \\ &\left. \Delta_5\left(\frac{x_3}{c}\right) \wedge (1 - W_t(k)) \right]. \quad (16) \end{aligned}$$

结合式(10),(15)和(16),有式(9)成立. □

### 3 数值模拟

微电子机械系统中齿轮与销接头之间的摩擦磨损通常会导致销断裂,这是微电子机械系统故障的主要原因. 当外力的累积强度大于某个阈值时,弹簧断裂. 运用不确定理论对微电子机械系统的故障模式进行建模. 参数的分布和取值如表1和表2所示,为了模拟提出的模型,表中的参数都是人为假设.

表1 参数的分布

参数	分布	参数	分布
$a$	$L(a_1, a_2)$	$a_1$	$L(0, 0.1)$
$a_2$	$L(0.3, 0.4)$	$b$	$L(b_1, b_2)$
$b_1$	$L(0, 10)$	$b_2$	$L(20, 30)$
$Y_i$	$\text{LOGN}(y_i, 1)$	$y_i$	$L(0, 1)$
$Z_i$	$N(z_i, 1)$	$z_i$	$L(1, 2)$

表2 参数值

参数	值
$K$	90
$L$	300
$c$	0.03

#### 3.1 确信可靠度的敏感性分析

由图1可以看出,可靠度对 $K$ 是敏感的, $K$ 越大,确信可靠度越高. 这是因为 $K$ 越大,磨损退化引起的设备故障的可能性越小,从而可靠度越高. 根据设备的磨损程度,可制定合理的维修或者替换策略,提高设备的可靠度.

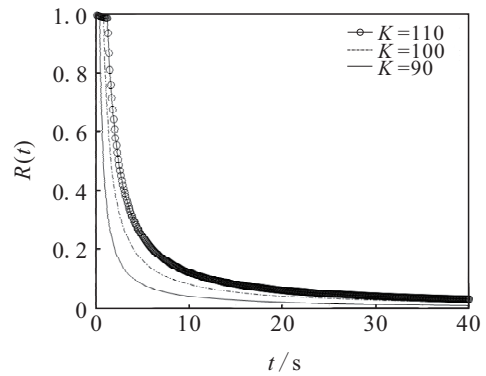


图1  $R(t)$ 对 $K$ 的敏感性

#### 3.2 确信可靠度在不确定参数和常数下的比较

参数为常数时,假设 $a, b, Y_i, Z_i$ 的分布如表3所示,其他参数同表2.

表3 变量的分布

变量	分布	变量	分布
$a$	$L(0, 0.35)$	$b$	$L(5, 25)$
$Y_i$	$\text{LOGN}(0.9, 1)$	$Z_i$	$N(1.9, 1)$

由图2可以看出,参数在两种不同情形下,确信可靠度是有区别的. 如果直接将参数看作常数,则系统的可靠度会有偏差,且参数为不确定变量情形下,系统的确信可靠度高于参数为常数的情形. 在具体问题中,将参数直接看作常数,会低估系统的确信可靠度. 在缺少数据的情形下,把专家的经验数据看作不确定变量来评估系统的可靠性是有意义的.

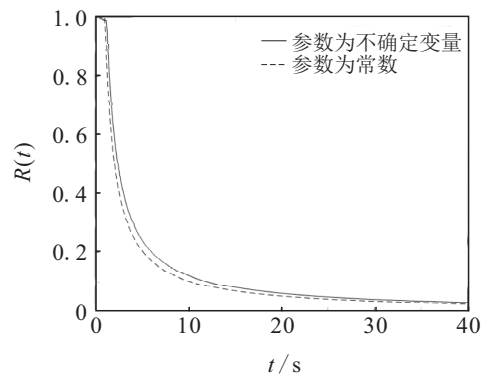


图2 参数为不确定变量和常数下的确信可靠度

### 4 结论

确信可靠度对磨损退化的阈值敏感,对累积外力的阈值不敏感,说明微电子机械系统故障的主要原因是磨损,而不是外力. 尽管外力会影响微电子机械系统的可靠性,但影响较小. 根据设备的磨损程度,可以制定合理的维修或者替换策略,提高设备的可靠度.

在失效数据缺少的情形下,将参数看作常数,会低估设备的确信可靠度. 因此,将参数看作不确定变量,能更准确地评估设备的可靠性. 今后,可将退化和冲击相依的不同情形,比如退化率改变、失效的阈值

随时间变化等,应用在一个具体问题的背景下,利用双重不确定变量进行研究。

### 参考文献(References)

- [1] 张晔, 王治华, 赵振平, 等. 两阶段非线性 Wiener 过程退化建模与可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(4): 954-959.  
(Zhang A, Wang Z H, Zhao Z P, et al. Two-phase nonlinear Wiener process method for degradation modeling and reliability analysis[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(4): 954-959.)
- [2] 鄢伟安, 宋保维, 段桂林, 等. 基于两阶段维纳退化过程的液力耦合器可靠性评估[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(9): 1882-1886.  
(Yan W A, An B W, Duan G L, et al. Reliability evaluation of LCD based on two-phase Wiener degradation process[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(9): 1882-1886.)
- [3] Peng H, Feng Q M, Coit D W. Reliability and maintenance modeling for systems subject to multiple dependent competing failure processes[J]. IIE Transactions, 2012, 43(1): 12-22.
- [4] Jiang L, Feng Q M, Coit D W. Modeling zoned shock effects on stochastic degradation in dependent failure processes[J]. IIE Transactions, 2015, 47(5): 460-470.
- [5] Song S L, Coit D W, Feng Q M, et al. Reliability analysis for multi-component systems subject to multiple dependent competing failure processes[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 63(1): 331-345.
- [6] Rafiee K, Feng Q M, Coit D W. Reliability analysis and condition-based maintenance for failure processes with degradation-dependent hard failure threshold[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2017, 33(7): 1351-1366.
- [7] Wang J, Bai G H, Li Z G, et al. A general discrete degradation model with fatal shocks and age-and state-dependent nonfatal shocks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193: 106648.
- [8] Liu B D. Why is there a need for uncertainty theory[J]. Journal of Uncertain Systems, 2012, 6(1): 3-10.
- [9] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [10] 胡林敏, 刘朝彩, 刘思佳. 双重不确定冷贮备系统的可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2656-2661.  
(Hu L M, Liu Z C, Liu S J. Reliability analysis of bi-uncertain cold standby systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(11): 2656-2661.)
- [11] Liu B D. Uncertainty theory[M]. The 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 207-288.
- [12] Liu B D. Uncertainty theory: A branch of mathematics for modeling human uncertainty[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 1-18.
- [13] Yao K, Zhou J. Uncertain random renewal reward process with application to block replacement policy[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2016, 24(6): 1637-1647.
- [14] Liu B L, Zhang Z Q, Wen Y Q. Reliability analysis for devices subject to competing failure processes based on chance theory[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 75: 398-413.
- [15] Peng J, Yao K. A new option pricing model for stocks in uncertainty markets[J]. International Journal of Operations Research, 2011, 8(2): 18-26.
- [16] Ji X Y, Zhou J. Option pricing for an uncertain stock model with jumps[J]. Soft Computing, 2015, 19(11): 3323-3329.
- [17] Yang L X, Liu P, Li S K, et al. Reduction methods of type-2 uncertain variables and their applications to solid transportation problem[J]. Information Sciences, 2015, 291: 204-237.
- [18] Zhang B, Peng J, Li S G. Uncertain programming models for portfolio selection with uncertain returns[J]. International Journal of Systems Science, 2015, 46(14): 2510-2519.
- [19] Yao K, Liu B D. Uncertain regression analysis: An approach for imprecise observations[J]. Soft Computing, 2018, 22(17): 5579-5582.
- [20] Yang X F, Liu B D. Uncertain time series analysis with imprecise observations[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2019, 18: 263-278.
- [21] Cao X R, Hu L M, Li Z Z. Reliability analysis of discrete time series-parallel systems with uncertain parameters[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(7): 2657-2668.
- [22] Liu Z C, Hu L M, Liu S J, et al. Reliability analysis of general systems with bi-uncertain variables[J]. Soft Computing, 2020, 24(9): 6975-6986.
- [23] 康锐. 确信可靠性理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 60-64.  
(Kang R. Belief reliability theory and methodology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 60-64.)

### 作者简介

师海燕(1982—), 女, 讲师, 从事可靠性理论及应用的研究, E-mail: pkshihaiyan@163.com;

魏淳(1978—), 男, 讲师, 从事可靠性理论及应用的研究, E-mail: jsj\_wei@163.com;

张志强(1969—), 男, 副教授, 博士, 从事不确定理论及应用等研究, E-mail: zhangzqhao@126.com;

刘宝亮(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事可靠性理论及应用等研究, E-mail: baoliang521@163.com;

温艳清(1980—), 女, 副教授, 博士, 从事可靠性理论及应用等研究, E-mail: oryqwen@163.com;

肖海燕(1974—), 女, 讲师, 从事可靠性理论及应用的研究, E-mail: xiaohaiyan\_68@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)