

基于加速退化试验的机械密封磨损寿命预测*

苏志善^{1,2}, 李 晗³, 郝木明⁴, 孙鑫晖⁴

(1.西北工业大学动力与能源学院 西安,710072) (2.中国航发西安动力控制科技有限公司 西安,710077)
(3.北京航天动力研究所 北京,100071) (4.中国石油大学(华东)新能源学院 青岛,266580)

摘要 针对目前机械密封应用领域高可靠性的要求,提出了基于随机过程的可靠性分析及磨损寿命预测方法。以密封端面磨损量为研究对象,设计适用于机械密封的加速退化试验以获得磨损退化数据。基于退化模型 Gamma 过程描述其磨损退化过程,引入双应力逆幂率模型作为加速模型描述转速、弹簧力与退化速率间的关系,从而建立机械密封可靠性分析与寿命预测模型。通过极大似然估计法求解模型参数,结合加速模型外推出多个应力水平下的模型参数并进行失效概率分析,对机械密封在不同可靠度需求下的可靠寿命及不同工作条件下的平均寿命作出了预测。结果表明, Gamma 过程适用于描述机械密封的磨损退化过程,通过双应力逆幂率模型外推获得各应力水平下的可靠度及寿命,此方法比传统的机械密封寿命预测方法具有更好的实用性和灵活性,可为密封产品确定维修周期及保证安全运行提供重要参考。

关键词 机械密封;寿命预测;加速退化试验;Gamma 过程;双应力逆幂率模型
中图分类号 TH117.2

引 言

机械密封具有泄漏量少、可靠性高和寿命长等优点^[1]。传统的加速退化试验研究机械密封可靠性,可有效提高试验效率,在短期内获得更多的试验数据^[2]。葛世荣等^[3]选用高参数值的方法进行抗磨寿命加速试验。孙见君^[4]设计机械密封加速摩擦磨损试验,结合分形理论建立加速试验模型。周剑锋等^[5]基于神经网络,结合加速试验理论对机械密封进行寿命预测。张思聪^[6]应用声发射技术进行机械密封加速寿命试验,提出基于 Wiener 过程的剩余寿命预测方法。传统的机械密封寿命研究仅对单一应力下密封失效寿命进行预测,无法应对实际应用工况临时改变导致原工况下试验数据无效的情况,且未涉及可靠度及可靠寿命的研究。在机械密封可靠性研究方面,顾永泉^[7]利用 Weibull 分布参数估计与故障分析相结合的方法对离心泵用机械密封作了可靠性分析。黄亚平^[8]用 Weibull 法分析了不同使用条件对同一机械密封可靠性的影响。粗糙表面的高度变化过程是非稳定的随机过程^[9-11],因此可视端面磨损的退化过程为一个随机过程。

笔者选用 Gamma 过程描述机械密封的端面磨损退化过程并进行验证,引入双应力逆幂率模型描述应力与退化速率间的关系,建立机械密封磨损可

靠性分析及寿命预测模型,外推常规应力下模型参数,进而预测不同运转条件下机械密封的寿命。

1 计算模型

1.1 退化模型

常用的退化模型有 Gamma 过程、Wiener 过程、Poisson 过程和线性混合效应模型等。机械密封的磨损退化过程作为一个非负递增的过程,可用 Gamma 过程描述加速应力与磨损退化过程之间的关系。

如果某产品在连续时间上的随机退化过程满足以下 3 个性质,则可称为 Gamma 过程^[12]。假设 $X(t)$ 表示此产品在 t 时刻的性能退化量,则有:

1) $X(t) \geq 0$ 且单调递增, $X(0) = 0$, 且 $X(t)$ 在 $t = 0$ 处连续;

2) $X(t)$ 具有独立的退化增量,即在任意时间段 (t_i, t_j) 与 (t_k, t_l) , 增量 $\Delta X_{ij} = X(t_j) - X(t_i)$ 与 $\Delta X_{kl} = X(t_l) - X(t_k)$ 之间相互独立;

3) 对于任意 $t_i < t_j$, 都有 $\Delta X_{ij} = X(t_j) - X(t_i)$ 服从 Gamma 过程 $Ga(v\Delta t_{ij}, u)$ 。其中:形状参数 v 表示应力对产品退化过程的影响;尺度参数 u 表示环境因素、人为因素等随机因素对产品退化过程的影响。

在建模过程中,通常认为在同一试验环境下随

* “两机”国家重大专项基金资助项目((KJ)HF WF1804 A0102)
收稿日期:2020-07-03;修回日期:2020-10-22

机因素带来的影响一致。假设某退化量 $X(t)$ 符合形状参数为 $v (v > 0)$, 尺度参数为 $u (u > 0)$ 的 Gamma 过程, 则其概率密度函数为

$$f(x|v, u) = \frac{1}{\Gamma(vt)u^{vt}} x^{vt-1} e^{-x/u} \quad (1)$$

其中: $x \geq 0$; $\Gamma(vt) = \int_0^{\infty} x^{vt-1} e^{-x} dx$ 为 Gamma 函数。

1.2 加速模型

许多试验数据表明, 逆幂律模型通常满足转速、载荷等机械应力作用下加速应力与样品退化速率之间的关系^[13]。标准逆幂律模型的表达式为

$$\partial x / \partial t = K = AS^b \quad (2)$$

其中: S 为应力水平; K 为退化速率; A, b 为相关常数。

对于双应力加速退化试验, 可在标准逆幂率模型的基础上引入一个应力项变为双应力逆幂律模型, 将式(2)改写为

$$K_k = AS_{1k}^b S_{2k}^c \quad (3)$$

其中: c 为常数; k 为应力水平数; S_{1k}, S_{2k} 分别为不同应力类型。

将式(3)两边取对数形式, 可得线性化双应力逆幂律模型为

$$\ln K_k = a + b \ln S_{1k} + c \ln S_{2k} \quad (4)$$

其中: $a = \ln A$ 。

在退化速率 K 不可知的情况下, 形状参数 v 同样可用于描述加速应力对退化过程的影响, 从而建立 Gamma 过程与双应力逆幂律模型的关联, 式(4)可转化为

$$\ln v_k = a + b \ln S_{1k} + c \ln S_{2k} \quad (5)$$

1.3 可靠性与寿命模型

设退化过程的失效阈值为 ω (ω 为常数), 其伪寿命 T 即为退化量达到失效阈值的时间。不同工作时间时样品的失效概率其物理意义表示产品在规定的条件及时间下发生失效的概率。由式(1)可得样品伪寿命 T 的分布函数, 即失效概率函数为

$$F(t, \omega) = P(T < t) = P[X(t) > \omega] = \int_{\omega}^{\infty} \frac{1}{\Gamma(vt)u^{vt}} x^{vt-1} e^{-x/u} dx = \frac{1}{\Gamma(vt)} \int_{\frac{\omega}{u}}^{\infty} \lambda^{vt-1} e^{-\lambda} d\lambda \quad (6)$$

失效概率密度函数为

$$f(t, \omega) = \frac{d}{dt} \int_{\omega}^{\infty} \frac{1}{\Gamma(vt)u^{vt}} x^{vt-1} e^{-x/u} dx = \frac{v}{\Gamma(vt)} \int_{\frac{\omega}{u}}^{\infty} \left[\ln(\lambda) - \frac{\Gamma'(vt)}{\Gamma(vt)} \right] \lambda^{vt-1} e^{-\lambda} d\lambda \quad (7)$$

由于式(7)可知, 失效概率密度函数难以求解,

可用伯恩鲍姆-桑德斯分布 (Birnbbaum Saunders, 简称 BS) 分布来逼近 T 的分布函数^[14], 则式(6)表示为

$$F(t, \omega) = P(T < t) \approx \Phi\left(\sqrt{vt} - \sqrt{\frac{\omega^2}{u^2 vt}}\right) \quad (8)$$

其中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布。

同时得到样品的失效概率密度函数为

$$f(t, \omega) = F'(t, \omega) = \Phi'\left(\sqrt{vt} - \sqrt{\frac{\omega^2}{u^2 vt}}\right) = \left(1 + \frac{\omega}{uvt}\right) \sqrt{\frac{v}{8\pi t}} e^{-\frac{1}{2vt}\left(vt - \frac{\omega}{u}\right)^2} \quad (9)$$

平均寿命是最常用且直观的产品可靠性指标, 即俗称的产品寿命, 通过计算寿命分布函数的期望值可得到样品平均寿命。平均寿命函数的表达式为

$$\bar{T} = E(T) = \int_0^{+\infty} f(t, \omega) dt = \frac{\omega}{vu} + \frac{1}{2v} \quad (10)$$

可靠度指产品在规定的条件及时间下保持正常工作的概率, 是产品可靠性的量化指标。可靠度与失效概率为对立关系, 可根据失效概率函数求得。可靠度函数为

$$R(t) = 1 - F(t, \omega) \approx 1 - \Phi\left(\sqrt{vt} - \sqrt{\frac{\omega^2}{u^2 vt}}\right) \quad (11)$$

1.4 参数估计

假设 X_{ijk} 为第 j 个样品在应力水平 S_k 下第 i 次测量的退化量, 退化量增量为 $\Delta X_{ijk} = X_{ijk} - X_{(i-1)jk}$, 测量时间为 t_{ijk} , 单位时间增量为 Δt_k 。其中: $i=1, 2, \dots, N_1$; $j=1, 2, \dots, N_2$; $k=1, 2, \dots, N_3$ 。

由 Gamma 过程性质可知

$$\Delta X_{ijk} \sim \text{Ga}(v\Delta t_k, u) \quad (12)$$

根据样品退化数据得到式(12)的似然函数为

$$L(v, u) = \prod_{i=1}^{N_1} \prod_{j=1}^{N_2} \prod_{k=1}^{N_3} \left[\frac{1}{\Gamma(v\Delta t_k) u^{v\Delta t_k}} \Delta X_{ijk}^{v\Delta t_k - 1} e^{-\frac{\Delta X_{ijk}}{u}} \right] \quad (13)$$

将极大值问题转化为极小值问题求解, 令

$$f = -\ln L(v, u) \quad (14)$$

将试验的加速退化数据代入式(14), 得到未知参数 v, u 的估计值向量。结合式(5)运用最小二乘估计法获得参数 a, b, c 的估计值, 外推出常规应力水平下 v 的估计值 \hat{v}_0 , 从而进行可靠性分析与寿命预测。其中, u 的估计值为 $\hat{u} = \sum_{k=1}^{N_3} n_k \hat{u}_k / \sum_{k=1}^{N_3} n_k$ 。

2 试验设计及数据

2.1 试验方案

试验选择转速 n 、弹簧力 F 作为加速应力, 以机

械密封的端面磨损退化过程进行试验研究。试验工装及密封环如图 1 所示。试验动环材质为 9Cr18 不锈钢;试验静环材质为 M298k 型碳石墨。密封端面结构参数如表 1 所示。试验介质为航空燃油。

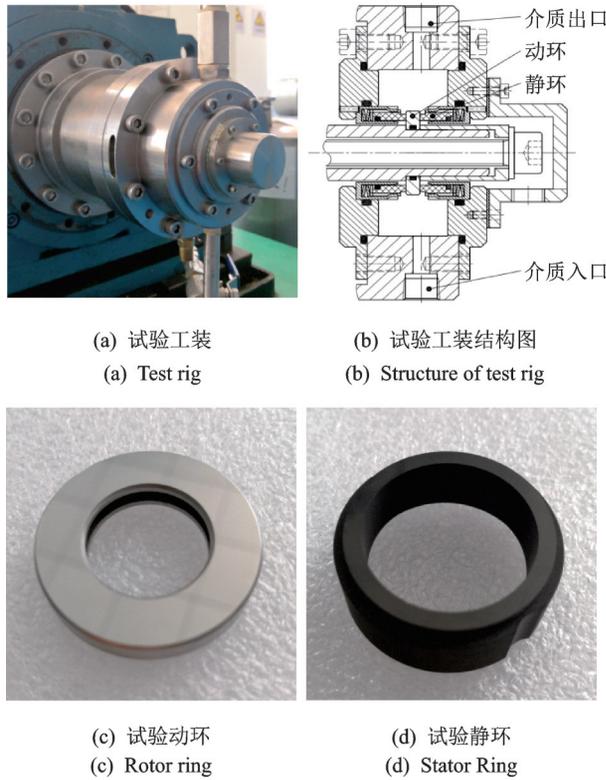


图 1 试验工装及密封环
Fig.1 Test rig and sealing ring

表 1 密封端面结构参数
Tab.1 Structural parameters of seal face

结构参数	数值
端面内径 d_1 /mm	25
端面外径 d_2 /mm	30
平衡直径 d_b /mm	24.7
端面宽度 b /mm	2.5
端面面积 S /mm ²	216
载荷系数 K	1.05

使用弹簧拉压试验机对试验所用波形弹簧的实际弹簧力进行测试,确定弹簧力 F 应力水平通过选用不同厚度推环的方式加载。转速 n 应力水平通过交流变频器加载。选择 12 N 与 3 kr/min 的组合作为常规应力水平 S_0 ,其余应力水平组合 S_1, S_2, S_3 作为加速应力,得到各应力水平如表 2 所示。

2.2 试验数据

试验静环沿周向均匀取 4 个位置作为测量点。测量不同时刻试验静环的高度变化,取 4 个测量位

置磨损量的平均值作为磨损退化数据,得到各应力下端面磨损量如图 2 所示。

表 2 试验应力水平

Tab.2 Stress level of test

应力水平	转速 / (kr·min ⁻¹)	弹簧力 /N	pv / (MPa·m·s ⁻¹)	测量时间 /h
S_0	3	12.0	2.51	5
S_1	6	26.7	5.60	4
S_2	9	43.7	9.43	3
S_3	12	97.1	16.84	2

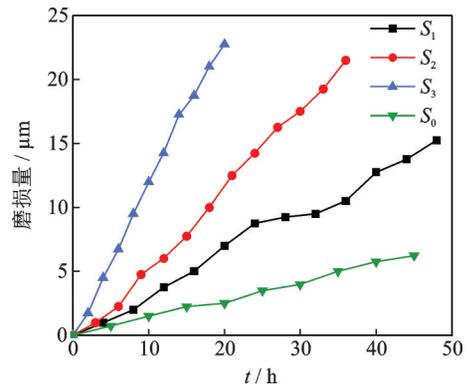


图 2 各应力下端面磨损量

Fig.2 Wear amount of of each stress

3 寿命预测

3.1 算法验证

在不代入 S_0 试验数据的情况下得到参数估计值 $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}$ 分别为 -6.430 7, 0.493 8 和 0.775 4,外推出常规应力 S_0 下模型的形状参数 $\hat{v}_0=2.731 2$ 、尺度参数 $\hat{u}_0=0.049 82$ 。通过 Monte Carlo 法对退化模型进行多次随机抽样并取平均值,对应力 S_0 下的磨损退化数据进行仿真,与 S_0 下实际试验数据进行对比。图 3 为磨损量仿真数据与试验数据对比。可见,整体变化趋势基本保持一致,从而验证了模型计算方法的正确性。

3.2 可靠寿命预测

本试验静环承磨台高度为 2 mm,取最大失效阈值 ω_{max} 为 2 000 μm ,计算应力 S_0 下可靠寿命 $t_{0.9}=14 604 \text{ h}$,仍能保持其运行状态的概率为 90%。

当对失效阈值有不同要求时,将 S_0 下模型参数估计值 \hat{v}_0, \hat{u}_0 和失效阈值 ω 代入式(11),得到在应力水平 S_0 下不同失效阈值的机械密封可靠度曲线如图 4 所示。可以看出,当累积磨损量接近失效阈值时,可靠度由较高水平快速降低,与机械密封实际运行时的失效过程相符。不同失效阈值下的可靠寿命

如表3所示,可见:对于可靠度要求较高的情况,机械密封的可靠寿命更短;对于允许失效阈值较大的情况,机械密封的可靠寿命更长。

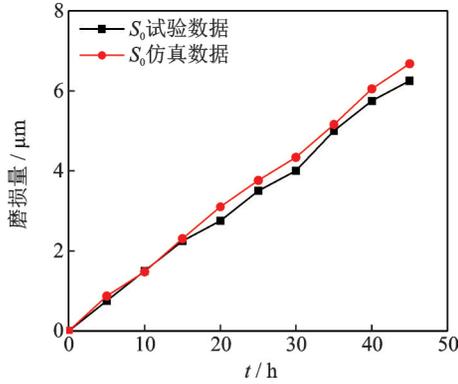


图3 磨损量仿真数据与试验数据对比

Fig.3 Comparison between simulation data and test data of wear amount

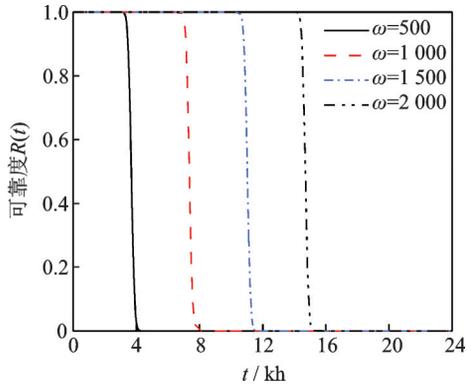


图4 不同失效阈值下机械密封可靠度曲线

Fig.4 Reliability curve at different failure thresholds

表3 不同失效阈值下的可靠寿命

Tab.3 Reliable lifetime at different failure thresholds

失效阈值/ μm	可靠寿命/h			
	$t_{0.99}$	$t_{0.9}$	$t_{0.75}$	$t_{0.5}$
500	3 383	3 514	3 590	3 675
1 000	7 058	7 189	7 265	7 349
1 500	10 732	10 864	10 939	11 023
2 000	14 528	14 604	14 648	14 698

3.3 外推应力分析

弹簧力 F 为 20 N 时,不同转速下失效概率曲线如图 5 所示。转速为 3 kr/min 时,不同弹簧力下的失效概率曲线如图 6 所示。可以看出,在初始运转时刻,各应力下失效概率接近于 0,但大于 0,随着运转的进行,较高应力水平下的失效概率先开始增大,即累积退化量达到失效阈值的概率增大,最终在失效概率达到 100% 时完全失效。随后,在较低应力下的失效概率也分别开始快速增大,但达到 100%

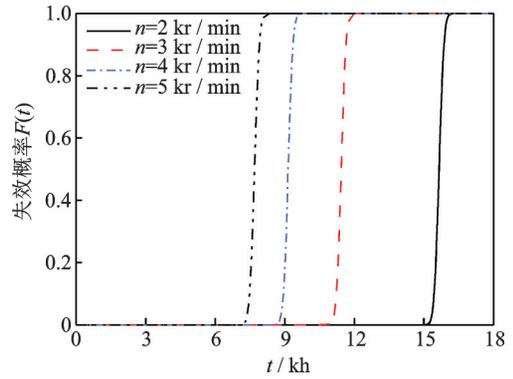


图5 不同转速下失效概率曲线

Fig.5 Failure probability under different speed

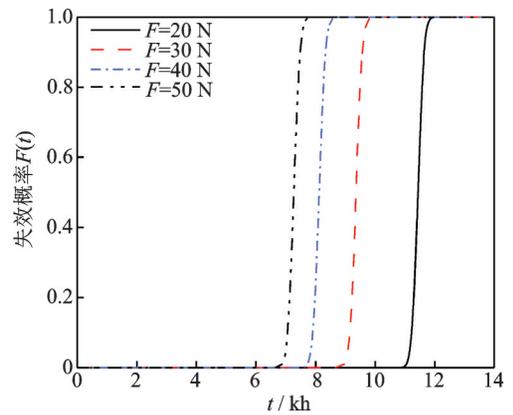


图6 不同弹簧力下失效概率曲线

Fig.6 Failure probability under different spring force

失效概率的时间更久,即密封失效寿命更长。

3.4 平均寿命预测

在失效阈值为 ω_{max} 时,将参数估计值 $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{\sigma}, \hat{u}$ 及应力水平 F, n 代入式(5)和式(10),得到平均寿命与转速、弹簧力的关系如图 7 所示。部分转速与弹簧力组合下的平均寿命如表 4 所示。可以看出,转速对平均寿命的影响比弹簧力更明显,这是因为影响端面磨损率大小的端面压力是由弹簧力和介质压力同时提供的。

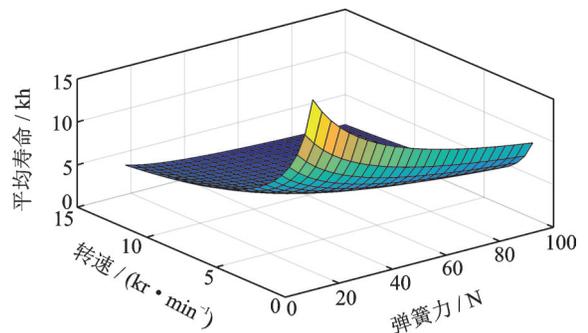


图7 平均寿命与转速、弹簧力关系

Fig.7 Relationship between average lifetime, rotating speed and spring force

表4 不同应力水平下平均寿命

Tab.4 Average life under different stress levels

转速/(kr·min ⁻¹)	弹簧力/N	平均寿命/h
1	20	26 772
	30	21 915
	40	19 012
	50	17 029
2	20	15 641
	30	12 803
	40	11 107
	50	9 948
3	20	11 421
	30	9 349
	40	8 111
	50	7 265
4	20	9 138
	30	7 480
	40	6 489
	50	5 812
5	20	7 686
	30	6 291
	40	5 458
	50	4 889

4 结 论

1) 基于加速退化试验数据的机械密封可靠性及寿命预测方法,比传统的机械密封可靠性分析方法具有更好的实用性与灵活性。

2) 通过对磨损数据进行假设检验,确定了Gamma过程适用于描述机械密封的磨损退化过程,可预测其在不同失效阈值要求下的可靠度及可靠寿命,为机械密封用于高可靠性需求领域提供了技术支持。

3) 双应力逆幂率模型可用于描述机械密封磨损退化率与转速、弹簧力之间的关系,并可外推退化模型参数,预测不同工作条件下平均寿命,为机械密封使用及维修提供参考。

参 考 文 献

- [1] 郝木明. 机械密封技术及应用[M]. 北京:中国石化出版社, 2010:226-228.
- [2] BOULANGER M, ESCOBAR L A. Experimental design for a class of accelerated degradation tests [J]. Technometrics, 1994, 36(3): 260-272.
- [3] 葛世荣, 索双富. 抗磨可靠性寿命的加速试验与预测[J]. 摩擦学学报, 1994, 36(3): 260-272.
- GE Shirong, SUO Shuangfu. Prediction on the reliable life of sliding wear by the accelerated wear test [J]. Tribology, 1994, 36(3): 260-272. (in Chinese)

- [4] 孙见君. 机械密封泄漏预测理论及其应用研究[D]. 南京:南京工业大学, 2006.
- [5] 周剑锋, 顾伯勤. 基于人工神经网络的机械密封寿命预测[J]. 流体机械, 2006(3): 19-23.
- ZHOU Jianfeng, GU Boqin. Lifetime Prediction of mechanical seal based on artificial neural networks [J]. Fluid Machinery, 2006(3): 19-23. (in Chinese)
- [6] 张思聪. 基于随机过程的机械密封剩余使用寿命预测[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [7] 顾永泉. 石油化工泵用机械密封的可靠性分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1988(3): 147-156.
- GU Yongquan. Petrochemical process pumps MFS reliability analysis [J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 1988(3): 147-156. (in Chinese)
- [8] 黄亚平. 机械密封的可靠性研究[J]. 流体机械, 2000, 28(11): 8-11.
- HUANG Yaping. Research on the reliability of mechanical seal [J]. Fluid Machinery, 2000, 28(11): 8-11. (in Chinese)
- [9] 魏龙, 孙见君. 机械密封的可靠性分析[J]. 化学工业与工程技术, 2002, 23(3): 16-18.
- WEI Long, SUN Jianjun. Analysis of the reliability of mechanical seal [J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2002, 23(3): 16-18. (in Chinese)
- [10] 周剑锋, 顾伯勤. 基于Monte Carlo法的机械密封可靠性评价方法[J]. 润滑与密封, 2006(2): 102-104.
- ZHOU Jianfeng, GU Boqin. Reliability estimation of mechanical seal based on Monte Carlo simulation [J]. Lubrication Engineering, 2006(2): 102-104. (in Chinese)
- [11] SAYLES R S. Surface topography as a non-stationary random process [J]. Nature, 1978, 271(2): 431-434.
- [12] PARK C, PADGETT W J. Accelerated degradation models for failure based on geometric brownian motion and gamma processes [J]. Lifetime Data Analysis, 2005(11): 511-527.
- [13] NELSON W. Accelerated life testing-step-stress models and data analyses [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 29(2): 103-108.
- [14] 汪赵新. 基于Gamma过程的步进应力加速退化试验设计方法[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.



第一作者简介:苏志善,男,1984年6月生,博士生、正高级工程师。主要研究方向为航空发动机燃油与控制系统设计。曾发表《等增益比燃油计量活门型孔设计计算》(《航空动力学报》2021年第36卷第6期)等论文。
E-mail: suzhishan8406@126.com

通信作者简介:孙鑫晖,男,1979年3月生,博士、讲师。主要研究方向为流体动密封和动态测试技术。
E-mail: sunxinhui@upc.edu.cn