

液压泵可靠性短时试验方法研究

郭锐^{1,2} 石玉¹ 赵静一^{1,2} 王萍³ 宁超¹

(1. 燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制重点实验室, 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004; 3. 燕山大学艺术与 Design 学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 液压泵属于高可靠长寿命产品,其可靠性对整机的可靠性和工作性能有着至关重要的影响,即使经过长时间的加速寿命试验仍可能出现无失效的情况,给液压泵可靠性评估带来了困难。针对传统的可靠性评估局限性,以容积效率退化数据为基础,应用非线性最小二乘法和最优化理论进行液压泵性能参数退化轨迹研究,提出了液压泵可靠性短时试验方法,将短时试验与可靠性寿命试验特征参数对比,证实了该方法的准确性和有效性。

关键词: 液压泵; 可靠性; 短时试验; 容积效率; 退化轨迹

中图分类号: TH137.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0405-08

Short-time Test Method of Reliability for Hydraulic Pumps

Guo Rui^{1,2} Shi Yu¹ Zhao Jingyi^{1,2} Wang Ping³ Ning Chao¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

3. College of Art and Design, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Hydraulic pumps belong to high reliability and long life product, its reliability has a critical influence on the reliability and performance of whole machine. After a long accelerated life test, it may still be non-failure for high reliability and long life products, which makes it difficult to assess reliability. Aiming at the limitation of the traditional reliability assessment techniques, the reliability of the hydraulic pumps short-time test method was proposed, which based on performance degradation theory to predict the reliability and residual life of products. To establish residual life prediction model for hydraulic pumps, based on the volumetric efficiency data, the nonlinear least-square method was adopted to fit time series, simultaneously, the optimum path search algorithm was built to select the best degradation path. The consistency check of the data in prediction model and the step-stress reliability life test were done by using non-parametric statistical theory, and the overall sample life distribution function was constructed with Monte Carlo numerical simulation method. The results show that the simulation data of fault sample distribution are consistent with step-stress reliability life values. Comparing the test parameters curves of the short-term test with step-stress accelerated life test, the correctness and feasibility of the short-time test method are further verified.

Key words: hydraulic pump; reliability; short-time test; volumetric efficiency; degradation path

引言

高可靠长寿命产品的试验时间难以获得足够的

退化数据来精确估计其可靠性与寿命。通过退化参数建立可靠性模型,以预测产品的可靠性和剩余寿命,属于特征参数预测技术^[1],在机械工程领

域^[2-4]、航空航天领域^[5]均有相关研究。SON等^[6-7]在分析性能可靠性时,基于轨迹跟踪法分析性能参数退化的轨迹。LU等^[8]根据退化参数分析失效模型,也是基于轨迹跟踪法。山东农业大学采用计算机虚拟仪器(VI)技术开发的液压泵性能试验测控系统,实现了液压泵的多参数实时数据采集、处理、显示、保存及控制等功能^[9]。液压泵退化性能参数同样作为液压泵寿命预测和可靠性评定的重要特征信息,故在液压泵可靠性试验方面也开展了相关研究。北京航空航天大学采用压力、转速和温度作为综合敏感应力,建立寿命和综合敏感应力模型并通过最优数值解法求得了航空液压泵的可靠度和可靠寿命指标^[10];进行了以柱塞间隙、出口阀开度为性能判据的柱塞泵性能可靠性分析,指出柱塞泵的流量特性受元部件设计参数退化的影响^[11];采用回油流量作为反映航空液压泵磨损状况的敏感信号,对其磨损状况进行了预测^[12]。南京理工大学提出了以高温小流量信号作为性能退化参数的液压泵可靠性分析方法^[13]。第二炮兵工程学院利用训练后的SRELM模型对液压泵的振动信号进行外推,预测液压泵健康状况^[14];综合考虑众多影响液压泵寿命状态参数(振动、压力、流量、温度、油液信息等)及它们之间关联性的基础上,采用振动信号进行液压泵寿命预测^[15]。

本文基于容积效率的液压泵可靠性试验,相比加速寿命试验更接近失效物理结果,并且以非线性回归理论为基础,综合考虑产品性能多种退化轨迹形式,获取最优模型来描述这种变化趋势,进而通过现场试验对产品的剩余寿命进行预测。

1 液压泵性能退化分析

1.1 液压泵性能退化机理

液压柱塞泵是一种典型的存在性能降级的系统,通常发生退化性失效。受磨损、温度、负载等环境因素的影响,其元部件的特征参数(柱塞间隙、弹簧刚度、阻尼等)会出现退化,并且这种退化最终会导致柱塞泵的主要性能指标——输出流量发生降级^[16]。

1.2 液压泵性能退化数据结构及模型

在总体中随机抽取容量为 n 的样本进行退化试验,在给定的 k 个时间点, $t_1 < t_2 < \dots < t_k$,监测某一性能退化参数, n 组退化试验数据记作 Z_{ij} ,表示在时间 t_j 第 i 个样本的测量值,退化数据和时间可描述为

$$Z_{ij} = \Phi(t_{ij}, w_{1i}, w_{2i}, w_{mi}) + \varepsilon_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

式中 ε_{ij} ——测量误差,服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布

$\Phi(t_{ij}, w_{1i}, w_{2i}, w_{mi})$ ——第 i 个样本在时间 t_{ij} 的退化轨迹

在误差允许范围内,产品的性能退化参数与时间序列矢量之间可以采用线性函数、指数函数、幂函数、对数函数和方程函数5种模型进行有效拟合,并将拟合后的退化轨迹近似看作产品性能参数的实际退化轨迹。

1.3 退化轨迹拟合实现方法

上述描述的非线性退化模型可以表示为

$$y = F(X, \alpha) + \varepsilon$$

式中 α ——模型系数矢量

X ——模型设计矩阵

F —— α 和 X 的函数 ε ——误差矢量

y ——响应数据矢量

非线性退化模型的求解可以通过非线性最小二乘法拟合实现,即

$$\min_x \frac{1}{2} \| F(x, \mathbf{x}_{\text{data}}) - \mathbf{y}_{\text{data}} \|_2^2 - \frac{1}{2} \sum_i (F(x, \mathbf{x}_{\text{data}_i}) - y_{\text{data}_i})^2 \quad (2)$$

其中 $\mathbf{y}_{\text{data}} = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}) \quad (i=1, 2, \dots, n)$

$\mathbf{x}_{\text{data}} = (t_1, t_2, \dots, t_m)$

式中 $F(x, \mathbf{x}_{\text{data}})$ ——矢量值函数

\mathbf{y}_{data} ——因变量矢量 \mathbf{x}_{data} ——自变量矢量

通过式(2)对多个退化轨迹进行数据拟合之后,对各个轨迹模型的拟合优度进行评价,指标包括残差、误差平方和和相关系数等。

1.4 最优退化轨迹搜索策略

假设 n 条退化轨迹方程可实施退化数据的拟合,有 m 个影响搜索方案的属性需要考虑。用 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 表示可供选择的退化轨迹的集,用 $Z = \{Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{im}\}$ 表示第 i 个轨迹的第 j ($j=1, 2, \dots, m$)个属性值的集合。如用目标函数表示属性,则属性 Z_{ij} 为

$$Z_{ij} = f_j(X_i) \quad (3)$$

各轨迹方案属性值用搜索决策矩阵 M 表示为

$$M = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对上述搜索决策矩阵进行加权规范化处理,得加权规范化决策矩阵,矩阵中元素表示为

$$N_{ij} = \frac{\lambda_j Z_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n Z_{ij}^2}} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式中 λ_j ——权重系数

1.5 最优退化轨迹求解算法

根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序的方法,首先确定一个最优解 K^+ 和一个最劣解 K^- ,然后找出与最优解距离最近且与最劣解距离最远的方案,作为最优方案^[17]。

最优解 K^+ 和最劣解 K^- 分别定义为

$$\begin{cases} K^+ = \{ ({}^{\max}_i X_{ij} | j \in J), ({}^{\min}_i X_{ij} | j \in J) | i = 1, 2, \dots, n \} = \\ \{ K_1^+, K_2^+, \dots, K_n^+ \} \\ K^- = \{ ({}^{\max}_i X_{ij} | j \in J), ({}^{\min}_i X_{ij} | j \in J) | i = 1, 2, \dots, n \} = \\ \{ K_1^-, K_2^-, \dots, K_n^- \} \end{cases} \quad (6)$$

式中 J ——效益型属性集

J' ——成本型属性集

每个解到最优解的距离 S_i^+ 为

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - X_j^+)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

每个解到最劣解的距离 S_i^- 为

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{ij} - X_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

为判断解的优劣,引入相对贴适度 L_i^+ 的概念来权衡两种距离的大小。

定义到最优解的相对贴适度 L_i^+ 为

$$L_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (0 \leq T_i^+ \leq 1; i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

L_i^+ 的值越接近 1 (或越大),表明相应的模型越符合实际数据的退化规律。

2 预测寿命检验

可靠性评估是建立在产品的寿命分布基础上,因此获取预测寿命的分布函数是可靠性评估的重要环节。工程中,对于要求精度较高的场合,往往采用假设检验的方法,其中非参数检验是在样本总体分布未知的情况下进行的一种检验,检验的目的是获取样本总体分布的具体形式。

K-S 检验方法理论上适合各种分布类型检验,尤其对于工程中经常出现的小子样情形^[18]。

考虑检验假设

$$H_0: F(X) = S(X) \quad (10)$$

式中 $S(X)$ ——完全已知的连续分布函数

$F(X)$ ——总体分布函数

根据 K-S 检验,将统计量

$$D_n = \sup_{-\infty < X < +\infty} |F(X) - S(X)| \quad (11)$$

作为 H_0 的检验统计量。sup 表示“上确界”,即最小上界。由于式中 $F(X)$ 和 $S(X)$ 均为关于 X 的单调非减函数,因而 D_n 的上确界可以在 X_i 处找到,如

图 1 所示。

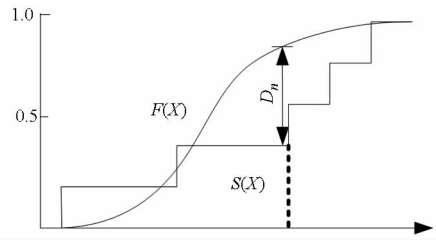


图 1 分布函数及检验统计量

Fig. 1 Distribution function and test statistic

首先求解次序统计量 X_i 对应的假设分布函数与样本经验分布函数最大偏差 δ_i 。则 δ_i 的最大值就是 K-S 检验统计量取值,即

$$D_n = \max(\delta_i) \quad (12)$$

因此可以得出 K-S 检验规则,即给定显著度为 α ,若 $D_n < D_{n,\alpha}$ ($D_{n,\alpha}$ 为检验临界值),则接受原假设,否则拒绝原假设 H_0 。

3 液压泵寿命短时试验

3.1 液压泵可靠性试验方案

3.1.1 液压泵可靠性试验条件

可靠性试验对象为宁波恒力液压股份有限公司生产的 A4VS 系列轴向柱塞泵,该系列产品标定的额定压力为 35 MPa,峰值压力为 40 MPa。

液压泵可靠性寿命试验按试验应力的加载方式可分为 3 种:恒定应力加速寿命试验,序进应力加速寿命试验,步进应力加速寿命试验。恒定应力加速寿命试验低应力时失效时间离散且对样本数量要求较多;序进应力加速寿命试验要求对应力控制准确,数据处理难度大;步进应力加速寿命试验失效发生快,所需样本少,故最终选择步进应力作为液压泵可靠性寿命试验的加载应力。

设定第 1 阶段压力为 35 MPa,第 2 阶段为 41 MPa 作为步进应力加速寿命试验条件,当其中一台泵失效时,即进入第 2 阶段,选择容积效率作为主要的性能检测参数。

3.1.2 液压泵可靠性试验台设计

图 2 所示的轴向主泵可靠性试验台,具有自主知识产权的试验原理方案并且充分考虑了能量回收因素。该方案可以同时 4 台轴向柱塞泵进行可靠性测试,图 3 中 7、10、11、13 均为可靠性测试对象。由于液压轴向柱塞泵与液压轴向柱塞马达在结构上是可逆的,试验过程中 7、11 为闭式轴向柱塞泵作马达工况使用。

3.1.3 液压泵可靠性试验数据分析

根据大量的实践经验,并且结合轴向柱塞泵自

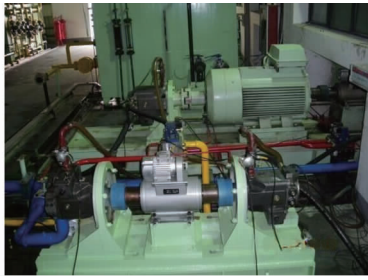


图2 可靠性试验台现场图片

Fig.2 Test rig of reliability

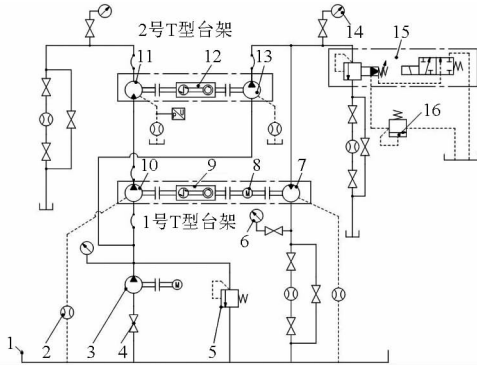


图3 轴向柱塞泵可靠性试验台工作原理图

Fig.3 Working principle of test station of axial piston pump reliability

1. 油箱 2. 流量计 3. 螺杆补油泵 4. 截止阀 5、16. 溢流阀
7、11. 被试轴向柱塞马达 8. 双轴伸电机 9、12. 扭矩转速仪
10、13. 被试轴向柱塞泵 14. 压力表 15. 加载阀

身的特点,采用两参数的威布尔分布模型对步进应力可靠性寿命试验的失效数据进行处理。

由于试验样本比较少,采用定数结尾步进应力加速寿命试验。第1试验阶段下3号泵失效,无故障时间为1030 h;第2阶段其余柱塞泵依次失效,未超过850 h。

通过计算机编写两参数威布尔分布的步进试验的数据处理程序,可得出特征寿命估计值4657.9 h,平均寿命4127.5 h,中位寿命3882.8 h。

3.2 液压泵容积效率退化轨迹求解

液压泵属于高可靠长寿命产品,采用步进应力试验的方法并采取功率回收方案,虽然实现了最大程度的节能,但试验仍然持续了将近2000 h,仍然消耗了大量能量。本文以液压泵的容积效率退化数据为基础,研究液压泵的可靠性短时试验方法。

根据前述步进应力加速寿命试验条件对4台试验样本进行试验,数据采集系统采集35 MPa下试验数据进行离线分析,得出4台液压泵的容积效率变化曲线。

通过非线性最小二乘拟合对4台被试样本的容积效率退化数据进行拟合,选取拟合所得模型参数

和误差平方和结果作为评价结果,如表1所示。

表1 误差平方和

Tab.1 Square sum of errors

退化模型	样本1	样本2	样本3	样本4
线性函数	0.0049	0.0188	0.0792	0.0136
指数函数	0.0056	0.0175	0.0808	0.0147
幂函数	0.0074	0.0267	0.1622	0.0180
对数函数	0.0073	0.0266	0.2597	0.0189
方程函数	0.0085	0.0319	0.2699	0.0028

根据表1建立原始搜索决策矩阵 M 。由于方案属性值为备选方案与各个样本观测数据之间拟合的误差平方和,彼此之间是平等的关系,因此可以考虑不分配权重,即认为 $\lambda_j = 1$ 。规范化矩阵为

$$N = \begin{bmatrix} 0.5786 & 0.5348 & 0.6484 & 0.5607 \\ 0.5063 & 0.5745 & 0.6356 & 0.5188 \\ 0.3831 & 0.3765 & 0.3166 & 0.4237 \\ 0.3884 & 0.3780 & 0.1978 & 0.4053 \\ 0.3336 & 0.3152 & 0.1903 & 0.2724 \end{bmatrix} \quad (13)$$

解得最优解的相对贴近期矩阵为

$$L_i^+ = [0.9682 \quad 0.8984 \quad 0.3107 \quad 0.2048 \quad 0]^T \quad (14)$$

根据相对贴近期矩阵可直观得出性能退化数据与线性退化模型 $y_i = \alpha_i t + \beta_i$ 拟合后与最优解的接近程度最高,为0.9682。因此,通过非线性最小二乘法拟合所得的模型参数可得出4台样本的容积效率退化模型。

$$\begin{cases} y_1 = -1.2550 \times 10^{-5}t + 0.9481 \\ y_2 = -2.4464 \times 10^{-5}t + 0.9484 \\ y_3 = -5.7492 \times 10^{-5}t + 0.9607 \\ y_4 = -1.5222 \times 10^{-5}t + 0.9445 \end{cases} \quad (15)$$

规定在35 MPa条件下,试验样本的容积效率退化到极限值87%时,相应的试验时间为液压泵的寿命。图4中,水平直线代表极限值,虚线代表容积效率的拟合退化轨迹,退化轨迹与水平直线交点对应的时间为液压泵的预测寿命。表2所示为液压泵预测寿命及容积效率拟合退化率。

3.3 短时试验预测寿命的非参数检验

需要验证通过短时试验方法获取的液压泵寿命与全寿命试验获取的液压泵寿命是否来自同一个母体,即检验两者分布函数的显著性差异。根据K-S两样本检验方法,假设步进应力加速寿命试验获取的寿命作为全寿命,分布函数记为 $F(x)$,将通过容积效率退化轨迹拟合预测的寿命分布函数记为 $G(x)$,提出零假设

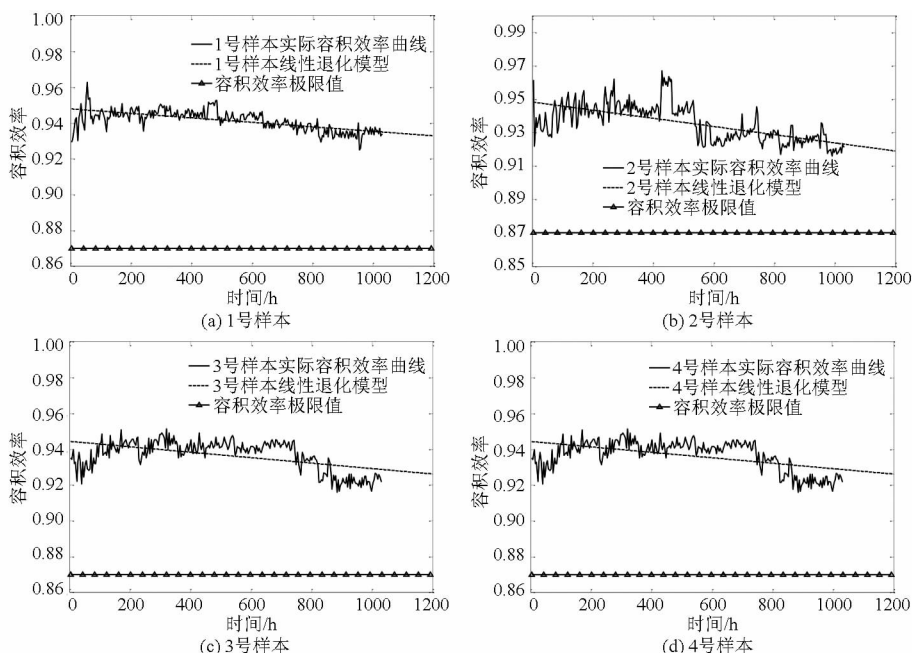


图 4 试验样本寿命估计
Fig. 4 Life estimation of samples

表 2 试验样本预测寿命数据

Tab. 2 Predicted life data of samples

序号	1	2	3	4
退化率	-1.255×10^{-5}	-2.4464×10^{-5}	-5.7492×10^{-5}	-1.5222×10^{-5}
寿命/h	6 216	3 204	1 578	4 895

表 3 检验结果分析

Tab. 3 Analysis of test results

检验结果	正态分布	对数正态分布	威布尔分布
h	0	0	0
p 值	0.916 0	0.939 6	0.962 4

分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{4482.4}\right)^{2.5}} \quad (18)$$

(2) 构建样本抽样公式

取 $\gamma(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m) = F(t)$ 为 $(0, 1)$ 上服从均匀分布的随机数序列, 其中 N 为样本容量, N 分别取 4、10、30、50、80、100、300、500。于是可获得液压泵故障样本抽样公式。

$$t = \eta (-\ln \gamma)^{\frac{1}{m}} \quad (19)$$

(3) 模拟液压泵可靠性试验故障过程

根据样本抽样公式, 通过计算机随机抽取一系列故障样本数据来模拟液压泵发生故障的过程, 模拟样本数量 N 依次为 4、10、30、50、80、100、300、500 时的故障仿真过程。

仿真的故障样本数据大多分布在 3 000 ~ 5 000 h 范围内, 即在该时间段内液压泵最容易发生故障, 这与步进应力加速寿命试验概率密度函数相吻合。

通过表 4 可知, 随着仿真样本量的增加, K-S 对不同分布类型检验结果显著性差异增大。在小样本试验中, 随着样本量的增加, 同一分布类型检验显著性明显增加, 当样本量大于等于 50 时, 随着样本量增加, 检验显著性没有明显增加。

表 5 表明, 随着样本量的增加, 检验结果精度不

$$H_0: F(x) = G(x) \quad (16)$$

相应的备择假设为

$$H_1: F(x) \neq G(x) \quad (17)$$

检验结果中, $h = 0$ 且 $p > \alpha$ 表示不能拒绝原假设。

K-S 检验结果分析 $\alpha = 0.05, h = 0, p = 0.9969$, 统计量为 0.25。

通过 K-S 检验结果可以判断, 通过液压泵可靠性短时试验方法获取的寿命数据与通过步进应力加速寿命试验获取的全寿命数据来自同一个母体。

3.4 小样本蒙特卡罗数据仿真

为了进一步推断液压泵寿命分布模型, 采用蒙特卡罗方法对样本发生故障的过程进行仿真。具体分析过程如下:

(1) 建立概率模型

通过前面所提出的非参数检验模型推断液压泵小样本短时寿命试验预测寿命分布模型, 检验结果如表 3 所示。

通过对表 3 检验结果进行分析可知, 小样本预测寿命数据服从威布尔分布。通过极大似然法对威布尔分布参数进行估计, 可得威布尔分布参数的点估计为 $\hat{m} = 2.5, \hat{\eta} = 4482.4$ 。

表4 模拟样本检验结果分析

Tab.4 Results of samples

样本量	检验结果	正态分布	对数正态分布	威布尔分布
4	<i>h</i>	0	0	0
	<i>p</i> 值	0.496 6	0.453 1	0.533 2
10	<i>h</i>	0	0	0
	<i>p</i> 值	0.531 3	0.256 9	0.458 6
30	<i>h</i>	0	0	0
	<i>p</i> 值	0.724 2	0.203 7	0.856 6
50	<i>h</i>	0	0	0
	<i>p</i> 值	0.519 6	0.403 3	0.889 1
80	<i>h</i>	0	0	0
	<i>p</i> 值	0.303 3	0.478 2	0.935 7
100	<i>h</i>	0	0	0
	<i>p</i> 值	0.532 2	0.451 3	0.859 6
300	<i>h</i>	0	0	0
	<i>p</i> 值	0.204 7	0.180 5	0.868 2
500	<i>h</i>	0	1	0
	<i>p</i> 值	0.260 7	0.000 2	0.964 0

表5 威布尔分布检验结果精度分析

Tab.5 Weibull analysis of test results accuracy

样本量	均值偏差	方差偏差	相关系数
4	19.861 1	102.589 6	0.881 13
10	0.928 95	0.220 41	0.876 7
30	0.699 50	0.235 24	0.947 16
50	0.504 68	0.068 15	0.945 69
80	0.331 04	0.014 96	0.952 87
100	0.355 91	0.008 98	0.977 1
300	0.166 15	0.002 15	0.951 5
500	0.132 88	0.001 71	0.954 33

断提高。当样本量大于等于50时,检验结果精度无明显提高。

3.5 短时试验与全寿命试验可靠性参数对比

通过蒙特卡罗数值仿真方法,当计算机仿真扩充样本容量为50时,液压泵寿命服从两参数威布尔分布,通过极大似然法估计形状参数 $\hat{m} = 2.4$,位置参数 $\hat{\eta} = 4489.6$,并令 $\gamma = 0$,可得表6 液压泵的短时试验参数。通过分析比较表6中短时寿命试验与全寿命试验密度函数 $f(t)$ 、分布函数 $F(t)$ 、可靠度函数 $R(t)$ 和故障率函数 $\lambda(t)$ 各参数可得出图5~8所示全寿命试验与短时试验各函数对比曲线。

通过比较分析图5~8的可靠性特征参数曲线可知,短时试验方法获取的概率密度函数曲线与全寿命试验方法的结果基本吻合,波峰出现的位置略有差异,这是由于两者位置参数的差异所导致的,在统计学上这种差异是可以接受的。

两种方法获得的分布函数和可靠度函数曲线基本一致,误差较小。短时试验方法获取的故障率函

表6 短时试验与全寿命试验可靠性参数对比

Tab.6 Comparison of reliability parameters used in short-time test and full-life test

函数	全寿命	短时试验
$f(t)$	$\frac{2.0138}{4657.9} \times \left(\frac{t}{4657.9}\right)^{1.0138} e^{-\left(\frac{t}{4657.9}\right)^{201.38}}$	$\frac{2.4}{4889.6} \times \left(\frac{t}{4889.6}\right)^{1.4} e^{-\left(\frac{t}{4889.6}\right)^{2.4}}$
$F(t)$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{4657.9}\right)^{201.38}}$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{4889.6}\right)^{2.4}}$
$R(t)$	$e^{-\left(\frac{t}{4657.9}\right)^{201.38}}$	$e^{-\left(\frac{t}{4889.6}\right)^{2.4}}$
$\lambda(t)$	$e^{-\left(\frac{t}{4657.9}\right)^{201.38}}$	$\frac{2.4}{4889.6^{2.4}} t^{1.4}$

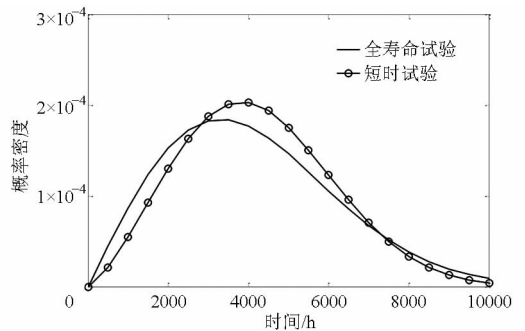


图5 概率密度函数对比曲线

Fig.5 Comparative curves of probability density function

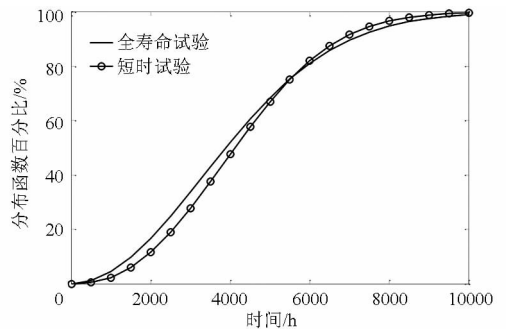


图6 分布函数对比曲线

Fig.6 Comparative curves of distribution function

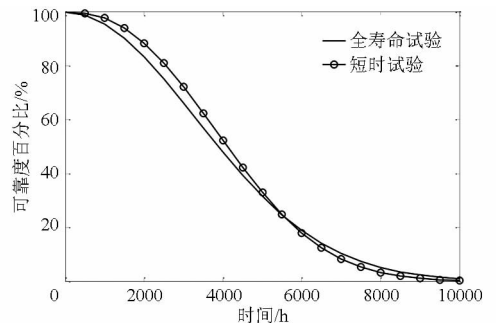


图7 可靠度函数对比曲线

Fig.7 Comparative curves of reliability function

数曲线在时间小于4000 h时,与全寿命试验结果基本吻合;在时间超过4000 h时,相对于全寿命试验,故障率曲线变得“陡峭”,但故障发生的趋势还是一

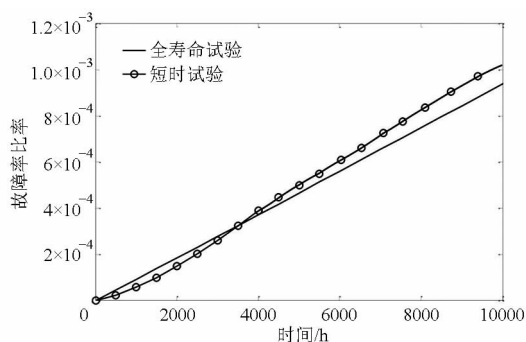


图8 故障率函数对比曲线

Fig. 8 Comparative curves of failure rate function

致的。

综合分析,采用短时试验方法评估液压泵可靠性指标,特征寿命为 4 889.6 h,平均寿命为 4 889.6 h;基于步进应力加速寿命试验评估液压泵可靠性指标,特征寿命为 4 657.9 h,平均寿命为 4 127.5 h,通过短时试验方法获取的可靠性特征量参数可以比较真实的反映液压泵的可靠性水平,说明本文所提出

的液压泵可靠性短时试验方法是可行的。由此可以做进一步的推广,利用液压泵可靠性短时试验方法可以得到液压泵伪失效寿命,利用伪失效寿命数据即可计算得出液压泵加速模型,从而可以外推出液压泵在不用应力工况下可靠性寿命参数指标,减少试验时间与成本。

4 结束语

基于性能退化理论,针对液压泵,以容积效率退化数据为基础,提出了可靠性短时试验方法,建立了容积效率最优退化轨迹模型和剩余寿命预测模型。通过非参数检验理论验证预测寿命与母体分布函数的一致性,并通过蒙特卡罗数值仿真的方法推断液压泵总体的寿命分布函数。最后,通过将短时试验方法获得的可靠性特征参数指标与步进应力加速寿命试验获取的可靠性特征参数指标对比,进一步验证了所提出的短时试验方法的正确性和可行性。

参 考 文 献

- 1 孙博,康锐,张叔农. 基于特征参数趋势进化的故障诊断和预测方法[J]. 航空学报,2008,29(2):393-398.
SUN Bo, KANG Rui, ZHANG Shunong. An approach to diagnostics and prognostics based on evolutionary feature parameters[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 29(2): 393-398. (in Chinese)
- 2 CAESARENDRA W, NIU Gang, YANG Bo-Suk. Machine condition prognosis based on sequential Monte Carlo method[J]. Expert Systems with Applications, 2010,37(3): 2412-2420.
- 3 YANG B S, TAN A C C. Multi-step ahead direct prediction for the machine condition prognosis using regression trees and neuro-fuzzy systems[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(5): 9378-9387.
- 4 ZHAO F, CHEN J, GUO L, et al. Neuro-fuzzy based condition prediction of bearing health[J]. Journal of Vibration and Control, 2009,15(7):1079-1091.
- 5 李本威,张赞,孙涛. 基于免疫粒子群算法的滑油屑末支持向量机预测模型设计[J]. 航空动力学报,2009,24(7):1639-1643.
LI Benwei, ZHANG Yun, SUN Tao. Design of forecasting model for aero-engine lubrication debris support vector machines based on immune-particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Aerospace Power,2009, 24(7):1639-1643. (in Chinese)
- 6 SON Y K, SAVAGE G J. A new sample-based approach to predict system performance reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57(2): 322-330.
- 7 SAVAGE G J,SON Y K. Dependability based design optimization of degrading engineering system[J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(1): 011002-1-011002-10.
- 8 LU C J, PARD J, YANG Q. Statistical inference of a time to failure distribution derived from linear degradation data[J]. Technometrics, 1997, 39(4):391-400.
- 9 李光提,李汝莘,康景峰. 基于虚拟仪器技术的液压泵试验测控系统的研制[J]. 农业机械学报,2005,36(12):134-137,121.
LI Guangti, LI Ruxin, KANG Jingfeng. Research of hydraulic pump measurement and control system based on virtual instrument technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(12):134-137,121. (in Chinese)
- 10 王少萍,李沛琼. 液压泵综合应力寿命试验方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(1):38-40.
WANG Shaoping, LI Peiqiong. Synthetic stress life testing for hydraulic pump[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2000,26(1):38-40. (in Chinese)
- 11 马纪明,詹晓燕. 具有随机退化特性的柱塞泵性能可靠性分析[J]. 机械工程学报,2010,46(14):189-193.
MA Jiming, ZHAN Xiaoyan. Performance reliability analysis of a piston pump affected by random degradation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(14):189-193. (in Chinese)
- 12 葛薇,王少萍. 航空液压泵磨损状况预测[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(11):1410-1414.
GE Wei, WANG Shaoping. Wear condition prediction of hydraulic pump[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2011,37(11):1410-1414. (in Chinese)

- 13 方峻,魏星,樊黎霞.基于性能退化数据的航空液压泵可靠性分析[J].机械研究与应用,2008,21(6):30-33.
FANG Jun, WEI Xing, FAN Lixia. Reliability analysis of aircraft hydraulic pump based on performance degradation data[J]. Mechanical Research & Application, 2008, 21(6): 30-33. (in Chinese)
- 14 张弦,王宏力.基于贯序正则极端学习机的时间序列预测及其应用[J].航空学报,2011,32(7):1302-1308.
ZHANG Xian, WANG Hongli. Time series prediction based on sequential regularized extreme learning machine and its application [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2011, 32(7): 1302-1308. (in Chinese)
- 15 何庆飞,陈桂明,陈小虎,等.基于改进灰色神经网络的液压泵寿命预测[J].中国机械工程,2013,24(4):500-506.
HE Qingfei, CHEN Guiming, CHEN Xiaohu, et al. Life prediction of hydraulic pump based on an improved grey neural network [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(4): 500-506. (in Chinese)
- 16 马纪明,詹晓燕.具有随机退化特性的柱塞泵性能可靠性分析[J].机械工程学报,2010,46(14):189-193.
MA Jiming, ZHAN Xiaoyan. Performance reliability analysis of a piston pump affected by random degradation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 189-193. (in Chinese)
- 17 姚成玉,陈东宁.基于最小割集综合排序的液压系统故障定位方法[J].中国机械工程,2010,21(11):1357-1361.
YAO Chengyu, CHEN Dongning. Fault localization method of hydraulic system based on minimum cut sets' comprehensive rank [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(11): 1357-1361. (in Chinese)
- 18 金星,洪延姬,沈怀荣,等.可靠性数据计算及应用[M].北京:国防工业出版社,2002:106-108.