

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220436-07

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220436

基于等效原理的滚动轴承加速试验设计与评估

李军星¹, 刘静涛¹, 张勇波², 邱明¹, 庞晓旭¹

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对越来越多的滚动轴承具有高可靠、长寿命的特点, 提出一种基于等效原理的滚动轴承加速试验设计与评估方法。首先根据等效原理, 建立了加速应力和正常应力之间的寿命分布关系式; 其次, 针对工程中常见的定时无失效、定时截尾和定数截尾 3 种数据类型, 推导出了轴承剩余强度分布形状参数的估计方法; 随后, 分别推导出滚动轴承在给定可靠度下的加速应力水平和试验截止时间和在给定应力下的轴承可靠度与可靠寿命的单侧置信下限; 最后, 结合某关节轴承工程实例进行验证分析, 结果表明: 该方法计算出的正常应力水平下寿命和可靠度单侧置信下限分别为 293.94 h 和 0.945, 与实际的 300 h 和 0.95 吻合较好, 为滚动轴承加速试验设计与评估提供有力的理论支撑。

关 键 词: 滚动轴承; 加速寿命试验设计; 可靠性评估; 等效原理; Weibull 分布

中图分类号: V474.2; TB301; O211

文献标志码: A

Accelerated test design and analysis of rolling bearings based on the principle of equivalence

LI Junxing¹, LIU Jingtao¹, ZHANG Yongbo², QIU Ming¹, PANG Xiaoxu¹

(1. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;

2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the characteristics that more and more rolling bearings have high reliability and long life, a method based on the principle of equivalence was proposed for the accelerated test design and assessment of rolling bearings. Firstly, the relationship between the accelerated stress and the normal stress in terms of life distribution was established based on the principle of equivalence. Secondly, the estimation method of the shape parameters of the residual strength distribution of the bearing was individually given for the three common data types in the engineering, including zero-failure data, type-I and type-II censored data. Subsequently, the accelerated stress levels and test cut-off times for rolling bearings at a given reliability, as well as the one-sided lower confidence limits for the bearing reliability and reliable life at a given stress, were derived, respectively. Finally, a validation analysis was conducted using a specific bearing engineering case study. The results indicated that the calculated lower one-sided confidence limits for life and reliability at normal stress levels were 293.94 h and 0.945, closely aligning

收稿日期: 2022-06-18

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2004403); 国家自然科学基金(52005159);

河南省高校青年骨干教师培养计划(2021GGJS048); 河南省青年托举人才项目(2023HYTP050);

河南省科技攻关项目(222102220061); 河南省科技研发计划联合基金应用攻关项目(232103810043)

作者简介: 李军星(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要从事小样本可靠性评估、加速寿命试验等研究。E-mail: lijun-xing2008@163.com

通信作者: 邱明(1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事轴承设计与制造等研究。E-mail: qiuming69@126.com

引用格式: 李军星, 刘静涛, 张勇波, 等. 基于等效原理的滚动轴承加速试验设计与评估[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220436. LI Junxing, LIU Jingtao, ZHANG Yongbo, et al. Accelerated test design and analysis of rolling bearings based on the principle of equivalence[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220436.

with the actual values of 300 h and 0.95. This could strongly support the design and evaluation of accelerated testing for rolling bearings.

Keywords: rolling bearings; accelerated life test design; reliability assessment; principle of equivalence; Weibull distribution

随着科学技术的发展和用户对滚动轴承质量要求的提高,越来越多的滚动轴承具有高可靠性与长寿命的特点。显然,传统的自然环境寿命试验法已不能满足目前情况下轴承的试验要求。因此,工程上常常采用加速寿命试验方法^[1-6]。

徐东等^[7]根据已知的加速寿命试验相关标准,结合积累的经验,提出了一套包括试验前检查、试验条件一致性分析、试验数据处理方法的滚动轴承加速试验方法。王坚永等^[8]通过对 6204/z1、30204 和 N209 轴承在不同载荷下进行加速寿命试验研究,定量和定性地说明了加速寿命试验的合理性和可行性。殷凤龙^[9]深入分析了滚动轴承疲劳失效机理,提出一种三参数 Weibull 参数估计方法,建立了比较完善的滚动轴承加速试验细则,并应用于滚动轴承的可靠性评估和寿命预测。张石平等^[10]以加速寿命试验方法为基础,建立了两参数 Weibull 加速寿命模型,对轴承在腐蚀环境下的可靠性进行了分析,给出了可靠性指标的点估计和区间估计,准确地预测出轴承的寿命及可靠度。赵慧^[11]基于固体润滑滚动轴承的失效机理,在拟合建立了两种固体润滑材料的磨损失效模型的基础上,对其可加速性进行判断,提出加速寿命试验方案,并建立了轴承的加速模型。董汉杰等^[12]以增大转速的方法对单排四点接触球转盘轴承进行了加速试验,通过传感器监测试验过程相关参数变化的方法,对其进行了分析。雷亚国等^[13]通过试验获得了滚动轴承的加速寿命试验数据集。并将该数据集整理发表,推动了故障诊断与剩余寿命预测等领域的算法研究。董炳武等^[14]通过加速寿命试验得到寿命信息,通过最小二乘法对 Weibull 分布的两个参数进行了估计,从而验证了不改变失效机理的情况下轴承加速寿命试验的可行性。张跃明等^[15]通过搭建加速寿命试验平台验证了其以 S-N 疲劳理论、Miner 理论为基础推导出的 RV 减速器寿命计算公式。Zhang 等^[16]研究了具有竞争失效的加速寿命测试 (ALT) 的统计推断,利用连接函数,构造了竞争失效模式的边际分布与其联合分布之间的统计依赖关系,并建立了参数估计的最大似然估计 (MLE)

模型,具有良好的准确性和通用性。Yang^[17]提出了一种在较高的应力水平和使用率 (UR) 条件下测试产品的方法,建立了失效 (UTF) 与应力和 UR 之间的关系,并用于估计设计应力和通常 UR 下的 UTF 分布,模型参数采用极大似然法进行估计,评估了测试计划的效率和灵敏度。Wang 等^[18]通过故障树分析,提出了导致轴承异常失效的因素,用准动力学方法分析了航空发动机轴承的边界条件与失效模式相关的状态参数的关系,为加速寿命试验中工作参数的选择和最终失效判断提供了理论依据。Nam 等^[19]提出了一种在高温下滚动轴承加速零失效试验的方法,将滚动轴承的寿命-载荷关系结合了基于轴承润滑油寿命-温度关系的 Arrhenius 模型,考虑了温度对轴承寿命的影响。

然而,对轴承进行加速寿命试验时,特别是航空航天轴承,由于其制造和试验成本都非常高,而且试验条件要求苛刻,导致可供试验的样本量极小,往往只有一至两件,工程上迫切需要建立一种极小子样加速寿命试验设计和可靠性分析方法。因此本文提出剩余强度分布形状参数未知情况下的基于等效原理的滚动轴承极小子样加速寿命试验设计和可靠性分析方法,并给出满足工程需要的寿命和可靠度置信下限。

1 基于等效原理的滚动轴承加速寿命试验设计

1.1 破坏率等效原理

设 $F(S_i, \theta_i)$ 为给定寿命 N^* 下加速应力水平 S_i 处轴承的剩余强度破坏率, $F(N^*, \theta_i)$ 为给定加速应力水平 S_i 下 N^* 处轴承的寿命破坏率,则根据寿命破坏率和剩余强度破坏率相等的原理,下式成立

$$F(N^*, \theta_i) = F(S_i, \theta_i) \quad (1)$$

式中 θ_i 和 θ_r 分别为寿命分布参数和剩余强度分布参数。

同理,设 $F(S_0, \theta_r)$ 为给定寿命 N^* 下正常应力水平 S_0 处轴承的剩余强度破坏率, $F(N^*, \theta_0)$ 为给定正常应力水平 S_0 下 N^* 处轴承的寿命破坏率,则下式成立

$$F(N^*, \theta_0) = F(S_0, \theta_r) \quad (2)$$

式中 θ_0 为正常应力水平 S_0 下的寿命分布参数。

因此, 通过联立式(1)和式(2), 可以建立不同应力水平下的寿命分布函数之间的关系。

对于任意给定应力水平, 轴承寿命 N 服从两参数 Weibull 分布

$$F(N, \beta) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{N}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (3)$$

其中 β 为位置参数, 即特征寿命; α 为寿命分布形状参数, 在加速寿命试验中 α 通常被认为是常数, α 在工程中已经存在许多统计数据^[20], 比如球轴承 $\alpha=10/9$, 滚子轴承 $\alpha=9/8$ 。在实际寿命试验中 α 的范围达 0.7~3.5, 甚至更宽。 α 越小, 表明轴承寿命的离散度越大。记 β_0 为常应力水平 S_0 下的位置参数; β_r 为加速应力水平 S_r 下的位置参数。

设轴承剩余强度分布为两参数 Weibull 分布

$$F(S, \beta_r) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{S}{\beta_r}\right)^{\alpha_r}\right\} \quad (4)$$

式中 β_r 为给定寿命下剩余强度分布的位置参数; α_r 为剩余强度分布形状参数。

由于寿命与剩余强度的破坏率是相等的, 所以正常应力水平与加速应力水平下的特征寿命存在以下关系

$$\left(\frac{\beta_0}{\beta_r}\right)^\alpha = \left(\frac{S_r}{S_0}\right)^{\alpha_r} \quad (5)$$

由式(3)可求得, 在正常应力水平 S_0 下给定可靠度 R 的可靠寿命 N_R 与特征寿命 β_0 的关系式

$$\beta_0 = N_R (-\ln R)^{-1/\alpha} \quad (6)$$

同理可得, 在加速应力水平 S_r 下给定可靠度 R 的可靠寿命 N_{rR} 与特征寿命 β_r 的关系式

$$\beta_r = N_{rR} (-\ln R)^{-1/\alpha} \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(5), 可以得到正常应力水平下可靠寿命 N_R 与加速应力水平下可靠寿命 N_{rR} 之间的关系式

$$N_{rR} = N_R \left(\frac{S_0}{S_r}\right)^{\alpha_r/\alpha} \quad (8)$$

由此可知, 在轴承可靠度为 R 时, 通过计算加速应力水平 S_r 下的可靠寿命是否能达到 N_{rR} 来对正常应力水平 S_0 下的可靠寿命是否能达到 N_R 进行验证。然而, 工程中对于轴承剩余强度分布形状参数 α_r 的统计数据积累较少, 如何确定剩余强

度分布形状参数 α_r 是进行极小子样的轴承加速寿命试验设计和可靠性分析的一个难题。

1.2 剩余强度分布形状参数的确定

在工程实际中, 轴承的中位寿命往往较容易得到, 则根据式(8)可得剩余强度分布的形状参数 α_r 为

$$\alpha_r = \alpha \frac{\ln N_{r50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_r} \quad (9)$$

式中 N_{50} 为在正常应力水平 S_0 下的轴承中位寿命; N_{r50} 为在加速应力水平 S_r 下的轴承中位寿命。中位寿命 N_{50} 和 N_{r50} 可以根据轴承的 S-N 曲线得到, 继而估计出剩余强度分布的形状参数。同时, 也可以根据在正常应力水平 S_0 下的试验数据和在加速应力水平 S_r 下的试验数据分别得到轴承的中位寿命 N_{50} 和 N_{r50} 。下面分别以定时无失效、定时截尾和定数截尾 3 种情况进行剩余强度分布形状参数的确定。

1.2.1 定时无失效试验数据

设在正常应力水平 S_0 下从一批轴承中任取 n 个轴承进行定时截尾寿命试验, 在时间达到 N_0 时无轴承失效。由式(6)可求得, 在正常应力水平 S_0 下轴承中位寿命

$$N_{50} = \beta_0 (\ln 2)^{1/\alpha} \quad (10)$$

由式(3)可知, 在截尾时间 N_0 处的可靠度为

$$R(N_0) = \exp\left\{-\left(\frac{N_0}{\beta_0}\right)^\alpha\right\} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可求得, 在正常应力水平 S_0 下轴承中位寿命为

$$N_{50} = N_0 \left[-\frac{\ln 2}{\ln R(N_0)} \right]^{1/\alpha} \quad (12)$$

又根据文献 [21] 可知, 对于无失效数据, 在 N_0 处的可靠度为

$$R(N_0) = 0.5^{\frac{1}{n+1}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可以得到, 对于在正常应力水平 S_0 下的定时无失效数据, 轴承的中位寿命为

$$N_{50} = N_0 (n+1)^{1/\alpha} \quad (14)$$

同理, 可以得到在加速应力水平 S_r 下无失效数据的轴承中位寿命 N_{r50} 。将中位寿命 N_{50} 和 N_{r50} 代入到式(9), 可以得到轴承剩余强度 Weibull 分布的形状参数 α_r 。

1.2.2 定时截尾试验数据

设从一批轴承中任取 n 个在正常应力水平 S_0 下进行定时截尾寿命试验,得到 q 个失效数据 $N_1, N_2, \dots, N_q$,其余 $n-q$ 个轴承试验至截止时间 N_0 均未失效。假设 N_{q+1} 为第 $q+1$ 个失效数据,则截止时间 N_0 可以看作位于区间 (N_q, N_{q+1}) 内的区间数据。由文献[22]可知,与区间数据 N_0 相对应的中位秩为

$$R(N_0) = \frac{n-q+0.7}{n+1.4} \quad (15)$$

将式(15)代入式(12)可以得到,对于在正常应力水平 S_0 下的定时截尾寿命试验数据,轴承的中位寿命为

$$N_{50} = N_0 \left[-\frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{n-q+0.7}{n+1.4} \right)} \right]^{1/\alpha} \quad (16)$$

同理,可以得到在加速应力水平 S_t 下,对于定时截尾寿命试验数据的轴承中位寿命 N_{t50} 。将中位寿命 N_{50} 和 N_{t50} 代入到式(9),可以得到轴承剩余强度 Weibull 分布的形状参数 α_r 。

1.2.3 定数截尾试验数据

设从一批轴承中任取 n 个在正常应力水平 S_0 下进行定数截尾寿命试验,得到 q 个失效数据 $N_1, N_2, \dots, N_q$,其余 $n-q$ 个轴承试验至截止时间 N_q 均未失效。则试验总时间为

$$T = \sum_{i=1}^q N_i^\alpha + (n-q) N_q^\alpha \quad (17)$$

由文献[1]可知,在正常应力水平 S_0 下轴承中位寿命为

$$N_{50} = \left[\frac{2 \ln 2}{\chi_{0.5}^2(2q)} T \right]^{1/\alpha} \quad (18)$$

式中 $\chi_{1-\gamma}^2(\cdot)$ 为卡方分布的分位数。

同理,可以得到在加速应力水平 S_t 下,对于定数截尾寿命试验数据的轴承中位寿命 N_{t50} 。将中位寿命 N_{50} 和 N_{t50} 代入到式(9),可以得到轴承剩余强度 Weibull 分布的形状参数 α_r 。

1.3 给定应力水平下的加速试验时间设计

由式(8)可知,轴承在正常应力水平 S_0 下给定可靠度 R 置信度为 γ 的可靠寿命要求达到 N_R 所需寿命试验时间的设计,可以转换为在加速应力水平 S_t 下给定可靠度 R 置信度为 γ 的可靠寿命要求达到 N_R 所需加速寿命试验时间的设计。下面

分别以定时无失效、定时截尾和定数截尾 3 种情况进行加速寿命试验时间设计。

1.3.1 定时无失效加速寿命试验时间设计

设在加速应力水平 S_t 下,从一批轴承中任取 n 个轴承进行定时截尾加速寿命试验,在规定时间 N_t 内无轴承失效。给出所需的试验截止时间 N_t ,以满足轴承在正常应力水平 S_0 下给定可靠度 R 置信度为 γ 的可靠寿命达到 N_R 的需求。

根据式(8)、式(9)和文献[21]可知,对于无失效加速寿命试验的情况,轴承所需的试验截止时间 N_t 可由下式计算

$$N_t = N_R \left(\frac{S_0}{S_t} \right)^{\left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \left[\frac{\ln(1-\gamma)}{n \ln R} \right]^{1/\alpha} \quad (19)$$

式中中位寿命 N_{50} 和 N_{t50} 可以根据轴承的 $S-N$ 曲线得到。同时,也可以由文中第 3.1 节提供的方法计算得到。

1.3.2 定时截尾加速寿命试验时间设计

设从一批轴承中任取 n 个在加速应力水平 S_t 下进行定时截尾加速寿命试验,在规定时间 N_t 内得到 q 个失效数据 $N_1, N_2, \dots, N_q$,其余轴承未失效。则总试验时间为

$$T = \sum_{i=1}^q N_i^\alpha + (n-q) N_t^\alpha \quad (20)$$

根据式(8)、式(9)和文献[1]可知,当总试验时间 T 满足

$$T \geq -\frac{N_R^\alpha \chi_{1-\gamma}^2(2q+2)}{2 \ln R} \left(\frac{S_0}{S_t} \right)^{\alpha \left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \quad (21)$$

即可停止试验。此时,轴承在正常应力水平 S_0 下给定可靠度 R 置信度为 γ 的可靠寿命至少为 N_R 。

1.3.3 定数截尾加速寿命试验时间设计

设从一批轴承中任取 n 个在加速应力水平 S_t 下进行定数截尾寿命试验,得到 q 个失效数据 $N_1, N_2, \dots, N_q$,其余 $n-q$ 个轴承未失效时间为 N_q 。则总试验时间为

$$T = \sum_{i=1}^q N_i^\alpha + (n-q) N_q^\alpha \quad (22)$$

根据式(8)、式(9)和文献[1]可知,当总试验时间 T 满足

$$T \geq -\frac{N_R^\alpha \chi_{1-\gamma}^2(2q)}{2 \ln R} \left(\frac{S_0}{S_t} \right)^{\alpha \left(\frac{\ln N_{50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \quad (23)$$

即可停止试验。此时,轴承在正常应力水平 S_0 下给定可靠度 R 置信度为 γ 的可靠寿命至少为 N_R 。

1.4 给定时间下的加速应力水平设计

为了验证轴承在正常应力水平 S_0 下给定可靠度为 R 置信度为 γ 的可靠寿命是否能达到 N_R , 需要进行加速寿命试验, 在给定的试验时间 N_t 下确定加速应力水平 S_t 。下面分别以定时无失效、定时截尾和定数截尾 3 种情况进行加速寿命试验应力水平设计。

1.4.1 定时无失效加速应力水平设计

对于定时无失效加速寿命试验情况, 根据式(19)可知, n 个轴承在加速应力水平 S_t 下试验

$$S_t = S_0 \left(\frac{N_R}{N_t} \right)^{\left(\frac{\ln S_0 - \ln S_t}{\ln N_{t50} - \ln N_{50}} \right)} \cdot \left[\frac{\ln(1-\gamma)}{n \ln R} \right]^{\left[\frac{\ln S_0 - \ln S_t}{\alpha (\ln N_{t50} - \ln N_{50})} \right]} \quad (24)$$

至时间 N_t 无一失效, 则可以认为该轴承在正常应力水平 S_0 下可靠度为 R 置信度为 γ 的可靠寿命至少为 N_R 。

1.4.2 定时截尾加速应力水平设计

对于定时截尾加速寿命试验情况, 根据式(20)和式(21)可知, n 个轴承在加速应力水平 S_t 下试验

$$S_t = S_0 \left[-\frac{N_R^\alpha}{T} \cdot \frac{\chi_{1-\gamma}^2(2q+2)}{2 \ln R} \right]^{\left[\frac{\ln S_0 - \ln S_t}{\alpha (\ln N_{t50} - \ln N_{50})} \right]} \quad (25)$$

且总试验时间为 $T = \sum_{i=1}^q N_i^\alpha + (n-q) N_t^\alpha$ 时, 则可以认为该轴承在正常应力水平 S_0 下可靠度为 R 置信度为 γ 的可靠寿命至少为 N_R 。

1.4.3 定数截尾加速应力水平设计

对于定数截尾加速寿命试验情况, 根据式(22)和式(23)可知, n 个轴承在加速应力水平 S_t 下试验

$$S_t = S_0 \left[-\frac{N_R^\alpha}{T} \cdot \frac{\chi_{1-\gamma}^2(2q)}{2 \ln R} \right]^{\left[\frac{\ln S_0 - \ln S_t}{\alpha (\ln N_{t50} - \ln N_{50})} \right]} \quad (26)$$

且总试验时间为 $T = \sum_{i=1}^q N_i^\alpha + (n-q) N_q^\alpha$ 时, 则可以认为该轴承在正常应力水平 S_0 下可靠度为 R 置信度为 γ 的可靠寿命至少为 N_R 。

2 滚动轴承加速寿命试验可靠性评估

在加速应力水平 S_t 下, 对轴承进行加速寿命试验, 获得试验数据。并以此对正常应力水平 S_0 下的轴承进行寿命预测和可靠性评估。下面分别对定时无失效、定时截尾和定数截尾 3 种情况进行讨论。

进行讨论。

2.1 定时无失效加速寿命试验可靠性评估

设在加速应力水平 S_t 下, 从一批轴承中任取 n 个轴承进行定时截尾加速寿命试验, 在规定的试验时间 N_t 内无轴承失效。根据式(8)、式(9)和文献[23]可知, 在可靠度 R 给定的情况下, 轴承在正常应力水平 S_0 下的可靠寿命 N_R 的置信度为 γ 的单侧置信下限为

$$N_{R_1} = N_t \left(\frac{S_t}{S_0} \right)^{\left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \left[\frac{n \ln R}{\ln(1-\gamma)} \right]^{1/\alpha} \quad (27)$$

在正常应力水平 S_0 下, 对于给定的使用寿命 N_R , 轴承可靠度 R 的置信度为 γ 的单侧置信下限为

$$R_1 = \exp \left\{ \frac{\ln(1-\gamma)}{n} \left(\frac{N_R}{N_t} \right)^\alpha \left(\frac{S_0}{S_t} \right)^{\alpha \left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \right\} \quad (28)$$

2.2 定时截尾加速寿命试验可靠性评估

设在加速应力水平 S_t 下从一批轴承中任取 n 个轴承进行定时截尾加速寿命试验, 在规定的试验时间 N_t 内有 q 个轴承失效, 得到一组定时截尾加速寿命试验数据。根据式(8)、式(9)和文献[1]可知, 在可靠度 R 给定的情况下, 轴承在正常应力水平 S_0 下的可靠寿命 N_R 的置信度为 γ 的单侧置信下限为

$$N_{R_1} = \left(\frac{S_t}{S_0} \right)^{\left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \left[-\frac{2T \ln R}{\chi_{1-\gamma}^2(2q+2)} \right]^{1/\alpha} \quad (29)$$

式中 T 为总试验时间, 可以式(20)给出。

在正常应力水平 S_0 下, 对于给定的使用寿命 N_R , 轴承可靠度 R 的置信度为 γ 的单侧置信下限为

$$R_1 = \exp \left\{ -\frac{N_R^\alpha \chi_{1-\gamma}^2(2q+2)}{2T} \cdot \left(\frac{S_0}{S_t} \right)^{\alpha \left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \right\} \lim_{x \rightarrow \infty} \quad (30)$$

2.3 定数截尾加速寿命试验可靠性评估

设在加速应力水平 S_t 下从一批轴承中任取 n 个轴承进行定数截尾加速寿命试验, 当有 q 个轴承失效时试验停止, 截止时间 $N_t = N_q$ 。根据式(8)、式(9)和文献[1]可知, 在可靠度 R 给定的情况下, 轴承在正常应力水平 S_0 下的可靠寿命 N_R 的置信度为 γ 的单侧置信下限为

$$N_{R_1} = \left(\frac{S_t}{S_0} \right)^{\left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \left[-\frac{2T \ln R}{\chi_{1-\gamma}^2(2q)} \right]^{1/\alpha} \quad (31)$$

式中 T 为总试验时间, 可以式(22)给出。

在正常应力水平 S_0 下,对于给定的使用寿命 N_R ,轴承可靠度 R 的置信度为 γ 的单侧置信下限为

$$R_l = \exp \left\{ -\frac{N_R^\alpha \chi_{1-\gamma}^2(2q)}{2T} \left(\frac{S_0}{S_t} \right)^\alpha \left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{S0}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right) \right\} \quad (32)$$

3 工程实例

为了确定关节轴承试件在正常应力水平 $S_0=10\text{ kN}$ 下,对于给定可靠度 $R=0.95$,可靠寿命的置信水平为 $\gamma=0.95$ 的单侧置信下限,以及对于给定使用寿命 $N_R=350\text{ h}$ 时,可靠度的置信水平 $\gamma=0.95$ 的单侧置信下限。本次试验选取 8 个关节轴承做定数截尾的寿命试验,试验分两组,4 个为一组。第 1 组是在正常应力水平 $S_0=10\text{ kN}$ 下进行试验,第 2 组是在加速应力水平 $S_t=25\text{ kN}$ 下进行加速试验。所有轴承均工作到失效为止,关节轴承的试验结果如表 1 所示。

表 1 关节轴承试验结果
Table 1 Test results of joint bearing

工况	编号	失效寿命/h
$S_0 = 10\text{ kN}$	Bearing 1-1	462
	Bearing 1-2	756
	Bearing 1-3	602.28
	Bearing 1-4	619.56
$S_t = 25\text{ kN}$	Bearing 2-1	224.2
	Bearing 2-2	280.33
	Bearing 2-3	320.62
	Bearing 2-4	361.25

关节轴承的寿命分布是服从 Weibull 分布的。在工程实际中,关节轴承的形状参数 α 并没有被明确地计算出来。因此对这两组轴承的寿命进行拟合,求出这两组轴承的形状参数 α 。计算得出 $S_0=10\text{ kN}$ 时,对应的形状参数 $\alpha_1=4.8648$; $S_t=25\text{ kN}$ 时,对应形状参数 $\alpha_2=4.923$ 。由式(18)可以求出,正常应力水平 S_0 下关节轴承的中位寿命 $N_{50}=605.68\text{ h}$;在加速应力 S_t 下关节轴承的中位寿命 $N_{t50}=294.51\text{ h}$ 。

关节轴承的剩余强度也服从 Weibull 分布,则根据式(9)可得剩余强度分布的形状参数 α_r 为

$$\alpha_r = \alpha \frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} = 3.828$$

根据式(31)可知,关节轴承在正常应力水平 $S_0=10\text{ kN}$ 下,对于给定的可靠度 $R=0.95$,可靠寿命 N_R 的置信水平为 $\gamma=0.95$ 的单侧置信下限为

$$N_{R_l} = \left(\frac{S_t}{S_0} \right)^{\left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{50}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right)} \left[-\frac{2T \ln R}{\chi_{1-\gamma}^2(2q)} \right]^{1/\alpha} \approx 325.6$$

由式(32)可求得,关节轴承在正常应力水平 $S_0=10\text{ kN}$ 下,对于给定使用寿命 $N_R=300\text{ h}$ 时,可靠度的置信水平 $\gamma=0.95$ 的单侧置信下限为

$$R_l = \exp \left\{ -\frac{N_R^\alpha \chi_{1-\gamma}^2(2q)}{2T} \left(\frac{S_0}{S_t} \right)^\alpha \left(\frac{\ln N_{t50} - \ln N_{S0}}{\ln S_0 - \ln S_t} \right) \right\} = 0.966$$

为了验证结果的准确性,本文运用了文献[24]的方法,对正常应力水平 $S_0=10\text{ kN}$ 下关节轴承的可靠性进行评估。

文献[24]对于给定可靠度 R 的可靠寿命 N_R 置信水平为 γ 的单侧置信下限为

$$N_{R_l} = \left[-\frac{2 \ln R}{\chi_{1-\gamma}^2(2n+2)} \sum_{i=1}^n N_i^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (33)$$

给定寿命 N_R 的可靠度 R 置信水平为 γ 的单侧置信下限为

$$R_l = \exp \left[-\frac{N_R^\alpha \chi_{1-\gamma}^2(2n+2)}{2 \sum_{i=1}^n N_i^\alpha} \right] \quad (34)$$

经计算,关节轴承在正常应力水平 $S_0=10\text{ kN}$ 下,对于给定的可靠度 $R=0.95$,可靠寿命 N_R 的置信水平为 $\gamma=0.95$ 的单侧置信下限 $N_{R_l}=293.94\text{ h}$,对于给定使用寿命 $N_R=300\text{ h}$ 时,可靠度的置信水平 $\gamma=0.95$ 的单侧置信下限 $R_l=0.945$ 。

计算结果如表 2 所示,通过对比可以看出,本文所提出的由加速应力 S_t 下的试验数据求得正常应力水平 S_0 下寿命单侧置信下限和可靠度单侧置信下限与实际由正常应力 S_0 下的试验数据求得的寿命单侧置信下限和可靠度单侧置信下限较为接近,说明本文所提出的方法具有很好的实用性。

表 2 计算结果
Table 2 Calculation results

工况	寿命/h	可靠度
$S_t = 25\text{ kN}$	325.6	0.966
$S_0 = 10\text{ kN}$	293.94	0.945

4 结 论

1) 本文提出的基于等效原理的滚动轴承加速寿命试验设计与可靠性分析方法,能够在极小子样的情况下,设计出加速应力水平和试验时间

来达到轴承正常应力水平下的可靠性要求; 另外, 也可以在轴承的加速寿命试验数据已知的情况下, 对常应力水平下的轴承进行可靠性分析。

2) 针对轴承 S-N 曲线已知的情况, 提出一种剩余强度分布形状参数估计方法。同时, 针对定时无失效、定时截尾和定数截尾 3 种数据类型, 给出了剩余强度分布形状参数的估计方法。

3) 对于定时无失效寿命试验、定时截尾寿命试验和定数截尾寿命试验 3 种 Weibull 分布加速寿命试验, 给出轴承极小子样试验设计和可靠性分析方法。

4) 本文方法尤其适用于极小子样的加速寿命试验, 节省试验时间, 计算简单, 便于工程应用。

参考文献:

- [1] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 1997. MAO Shisong, WANG Lingling. Accelerated life test[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [2] 张春华, 温熙森, 陈循. 加速寿命试验技术综述[J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 485-490. ZHANG Chunhua, WEN Xisen, CHEN Xun. A comprehensive review of accelerated life testing[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(4): 485-490. (in Chinese)
- [3] ESCOBAR L A, MEEKER W Q. A review of accelerated test models[J]. *Statistical Science*, 2006, 21(4): 552-577.
- [4] 黄婷婷, 姜同敏. 加速寿命试验中统计加速模型综述[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 57-62. HUANG Tingting, JIANG Tongmin. Review of statistical acceleration models in accelerated life testing[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2010, 7(4): 57-62. (in Chinese)
- [5] NELSON W B. Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis[M]. Hoboken, US: John Wiley & Sons, 2009.
- [6] 张勇波, 傅惠民, 王治华. 恒定应力无失效加速寿命试验可靠性分析方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 520-524. ZHANG Yongbo, FU Huimin, WANG Zhihua. Method for reliability analysis on constant-stress zero-failure accelerated life test[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(3): 520-524. (in Chinese)
- [7] 徐东, 徐永成, 陈循, 等. 滚动轴承加速寿命试验技术研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(6): 122-129. XU Dong, XU Yongcheng, CHEN Xun, et al. Research on accelerated life test for rolling element bearings[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2010, 32(6): 122-129. (in Chinese)
- [8] 王坚永, 庄中华, 吴秀鸾, 等. 滚动轴承可靠性加速寿命试验研究[J]. 轴承, 1996(9): 23-28, 45. WANG Jianyong, ZHUANG Zhonghua, WU Xiuluan, et al. Experimental study on reliability accelerated life of rolling bearing[J]. *Bearing*, 1996(9): 23-28, 45. (in Chinese)
- [9] 殷凤龙. 基于加速寿命试验的滚动轴承寿命预测研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012. YIN Fenglong. Research on life prediction for rolling bearing based on accelerated life testing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] 张石平, 王智明, 杨建国. 腐蚀应力加速寿命试验条件下滚动轴承的可靠性评估[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 2132-2137. ZHANG Shiping, WANG Zhiming, YANG Jianguo. Reliability assessment for rolling bearings using accelerated life testing under corrosion stress conditions[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(8): 2132-2137. (in Chinese)
- [11] 赵慧. 固体润滑滚动轴承加速寿命试验方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. ZHAO Hui. Study on accelerated life test method of solid lubricated rolling bearing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [12] 董汉杰, 陈捷, 洪荣晶, 等. 转盘轴承满载加速寿命试验及评判指标研究[J]. 轴承, 2017(2): 37-41. DONG Hanjie, CHEN Jie, HONG Rongjing, et al. Research on full load accelerated life test and evaluation index of slewing bearings[J]. *Bearing*, 2017(2): 37-41. (in Chinese)
- [13] 雷亚国, 韩天宇, 王彪, 等. XJTU-SY 滚动轴承加速寿命试验数据集解读[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 1-6. LEI Yaguo, HAN Tianyu, WANG Biao, et al. XJTU-SY rolling element bearing accelerated life test datasets: a tutorial[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(16): 1-6. (in Chinese)
- [14] 董炳武, 牛荣军, 徐曼君, 等. 高频轻载自润滑关节轴承加速寿命试验方法[J]. 轴承, 2021(3): 21-25. DONG Bingwu, NIU Rongjun, XU Manjun, et al. Test method for accelerated life of high-frequency light-load self-lubricating spherical plain bearings[J]. *Bearing*, 2021(3): 21-25. (in Chinese)
- [15] 张跃明, 冀永虎, 纪妹婷, 等. RV 减速器的寿命计算与加速寿命试验[J]. 机械设计与制造, 2020(8): 270-274. ZHANG Yueming, JI Yonghu, JI Shuting, et al. Life calculation and accelerated life test of RV reducer[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(8): 270-274. (in Chinese)
- [16] ZHANG Xiangpo, SHANG Jianzhong, CHEN Xun, et al. Statistical inference of accelerated life testing with dependent competing failures based on copula theory[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2014, 63(3): 764-780.
- [17] YANG Guangbin. Accelerated life tests at higher usage rates[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, 54(1): 53-57.
- [18] WANG Liqin, LI Yunfeng. Boundary for aviation bearing accelerated life test based on quasi-dynamic analysis[J]. *Tribology International*, 2017, 116: 414-421.
- [19] NAM J S, KIM H E, KIM K U. A new accelerated zero-failure test model for rolling bearings under elevated temperature conditions[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(6): 1801-1807.
- [20] US Department of Defense. Composite materials handbook, volume 3 polymer matrix composites materials use, design, and analysis: 978-1-4686-0635-5[S]. US: SAE, 2012: 83-121.
- [21] 傅惠民. 不完全数据秩分布理论[J]. 航空学报, 1993, 14(11): 578-584. FU Huimin. Theory of incomplete data rank distributions[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1993, 14(11): 578-584. (in Chinese)
- [22] 傅惠民. 区间统计量及其分布[J]. 机械强度, 2005, 27(6): 752-757. FU Huimin. Interval statistic and its distribution[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2005, 27(6): 752-757. (in Chinese)
- [23] 杨晓蔚. 滚动轴承的可靠性设计[J]. 轴承, 2013(12): 1-5. YANG Xiaowei. Reliability design of rolling bearings[J]. *Bearing*, 2013(12): 1-5. (in Chinese)
- [24] 李军星, 张勇波, 傅惠民, 等. 离子推力器极少数据可靠性评估方法[J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2352-2356. LI Junxing, ZHANG Yongbo, FU Huimin, et al. Reliability evaluation method of ion thruster with very few failure data[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(10): 2352-2356. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)