

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0122- 08

滚动轴承加速寿命试验技术研究*

徐 东¹, 徐永成¹, 陈 循¹, 李兴林², 杨拥民¹

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;

2. 杭州轴承试验研究中心有限公司, 浙江 杭州 310022)

摘要: 为了有效地获取滚动轴承具有可比性的加速寿命试验数据, 利用已有加速寿命试验相关标准, 结合实际滚动轴承加速寿命试验设计和实施中积累的经验, 深入分析滚动轴承加速寿命试验过程中遇到的各种问题, 提出一套完整的滚动轴承加速寿命试验方法。该方法对相关标准没有涉及的试验前检查、试验条件一致性分析和试验数据的处理方法进行了补充并对加速寿命试验进行深入分析, 形成完整的滚动轴承加速寿命试验解决方案, 可以有效地指导滚动轴承加速寿命试验的设计和实施。

关键词: 滚动轴承; 加速寿命试验; 一致性检验; 加速模型; 加速因子

中图分类号: TH133. 1 文献标识码: A

Research on Accelerated Life Test for Rolling Element Bearings

XU Dong¹, XU Yong-cheng¹, CHEN Xun¹, LI Xing-lin², YANG Yong-min¹

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hangzhou Bearing Test & Research Center (HBRC), Hangzhou 310022, China)

Abstract: In order to obtain valid and comparable data from ALT for rolling element bearings, almost all problems which may appear in the process of ALT for rolling element bearings were investigated comprehensively. Then an orbicular method of ALT for rolling element bearing was proposed based on the existent standardizations of ALT for rolling element bearings and experience accumulated in the process of actual design and implementation. The method has complemented such omissions as pre-experiment checking, uniformity verification and signal processing which the existent standardizations and traditional life test schemes have not considered, and then formed an integral solving scheme of ALT for rolling element bearings. This scheme can be used as a guide for the design and application of ALT for rolling element bearings.

Key words: rolling element bearing; accelerated life test; uniformity verification; accelerated model; accelerated coefficient

随着材料科学的发展和工艺水平的进步, 产品的可用寿命越来越长, 这就使得使用常规寿命试验的试验时间越来越长并增加了试验成本, 迫使采用加速失效的方式以缩短试验时间和缩减试验成本。1967年, 美国罗姆航展中心首次给出加速寿命试验的统一定义^[1]。数十年来, 加速寿命试验得到了迅猛的发展, 出现多种不同的加速寿命试验方法: 从试验样本失效情况上分有完全寿命试验和截尾寿命试验; 从应力加载方式上分有恒定应力、步进应力、序进应力、循环应力、随机应力等加载方式^[2-6]。

所有加速寿命试验均是在时间和经费制约下的一种不得已的行为, 因此获得准确可信的加速寿命试验数据并通过某加速模型估计的常规情况下产品的寿命可信是加速寿命试验追求的目标。滚动轴承作为旋转机械系统中的一种关键部件, 是导致旋转机械系统失效的主要因素之一, 因此了解滚动轴承的寿命分布有助于提高旋转机械系统的预防性维修的准确性。目前已有许多滚动轴承加速寿命试验设计和实施标准^[7-9], 但是这些标准在指导实际加速寿命试验时存在内容过泛, 只考虑轴承失效结果而不注重试验过程和虽然在一定程度上对试验前试验条件一致性进行了考虑但没有给出整个试验过程试验条件一致性该如何保证等问题。

* 收稿日期: 2010- 05- 26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50705096); 国家部委基金资助项目(06KG0187)

作者简介: 徐东(1982-), 男, 博士生。

本文通过对滚动轴承加速寿命试验标准和已有加速寿命试验技术的分析,结合实际滚动轴承加速寿命试验设计和实施中积累的经验,提出一套切实可行的滚动轴承加速寿命试验方案。

1 滚动轴承加速寿命试验方案

为了对滚动轴承加速寿命试验方案有个比较清晰的了解,可将加速寿命试验分成试验前准备、试验一致性检验、试验流程、数据采集流程和数据分析等5个部分,每个部分又分为若干实施细则,如图1所示。

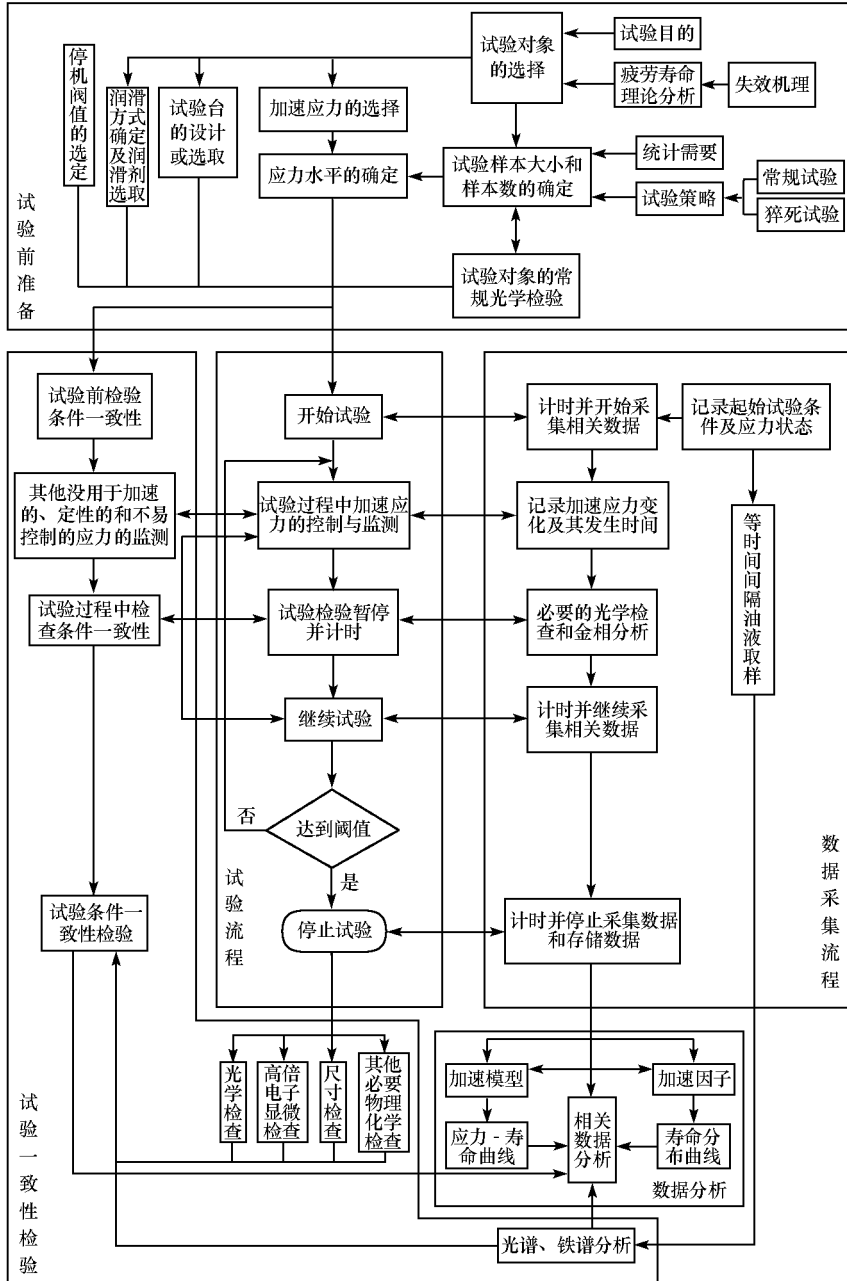


图1 滚动轴承加速寿命试验整体方案

Fig. 1 Integral scheme of ALT for rolling element bearings

从图中可以对滚动轴承加速寿命试验有个直观的认识,后文将就各部分进行详细的分析和说明。

2 试验前准备

试验前必须熟知滚动轴承可能的失效模式、对应的失效原因、相应的故障类型等,并根据试验目的、统计需要以及试验时间和试验经费等条件限制选择相应的加速试验方法,确定诸如试验对象、样本数和样本大小、加速应力及应力水平等相关量,选取或设计相应的试验台和传感器,选择合适的停机阈值并确立停机阈值大小,确定润滑方式等。

2.1 试验对象及加速试验方法的确定

根据具体的试验目的选择相应的试验对象,并根据试验经费和试验时间选择不同的加速寿命试验方式。常用的滚动轴承加速寿命试验方法有两种:恒定应力加速试验和步进应力加速试验,且又分为完全试验和截尾试验。试验方法需要根据相应制约因素来确定。一般情况下采用定时或定数截尾的步进应力加速寿命试验方法,这样可以缩短试验时间,并可以在有限的经费内增多试验样本失效个数。所加应力大小以不改变滚动轴承失效机理为准,实践得出结论要求 $P/C < 0.45$,一般为 0.25 左右。

2.2 传感器的选择及安装位置的确定

对于滚动轴承来说,运转过程中可以测的物理量有温度、振动、噪声等,而相应的测试传感器也有接触式和非接触式两种。滚动轴承的常规监测主要是对温度和振动进行的,对于油浴润滑的滚动轴承,温度传感器可浸入轴承附近的润滑油中;对于脂润滑或油雾润滑的滚动轴承,温度传感器一般接触轴承外圈放置(外圈固定、内圈旋转时)。

滚动轴承最常用的监控是对于振动信号的监控。目前测试振动信号的传感器可分为三种:位移传感器、速度传感器和加速度传感器。相对来说,采用加速度传感器可以有效地感知故障产生的冲击,所测量的信号的包络频谱可以直观地反映冲击的规律,因此一般采用加速度传感器。

另外需要根据振动信号所需的采样频率、采样精度选择量程和灵敏度合适的传感器。滚动轴承的故障特征频率与轴承尺寸和旋转角速度有关,要求传感器量程能覆盖所有可能发生的故障特征频率。在满足条件限制下选择大量程低灵敏度传感器,可通过包络分析提取故障频率和降低干扰影响。

2.3 几种可供选择的停机阈值

停机阈值的选择和阈值大小的确定是加速寿命试验非常重要的一环,关系到试验的成败。常见可用于滚动轴承寿命试验的停机阈值有裕度、峭度、峰值因子、波形因子、均方根值等,如表 1 所示。

表 1 滚动轴承常用的特征量

Tab. 1 Characteristic quantity of rolling element bearings

特征指标	计算公式	特征指标	计算公式
均值	$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	均方根值	$\Psi_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$
峭度因子	$K_v = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \right]^2}$	峰值因子	$C_f = \frac{\max(x_i)}{\Psi_x}$
方差	$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2$	裕度因子	$CL_f = \frac{\max(x_i)}{\left \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{ x_i } \right ^2}$
脉冲因子	$I_f = \frac{\max(x_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i }$	波形因子	$S_f = \frac{\Psi_x}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i }$

在工程上最常用的为均方根值、峭度、波形因子等。其中峭度对于早期故障比较敏感,但是也正是因为这种优势造成其应用的局限,试验中任何不稳定因素均能引起轴承振动信号峭度的剧烈变化,因此一般不用峭度作为停机阈值,但是必须作为一项监控的指标。另外由于轴承振动信号为非线性非平稳

信号,采用波形因子并不能很好地描述轴承的健康状态。目前,绝大部分自动控制的轴承试验机采用均方根值作为停机阈值,相对来说均方根值反映的是轴承振动统计量,能较好地反映轴承故障的健康状态。不足之处为其对初始故障不敏感。

2.4 润滑方式的选择

滚动轴承可分为闭式和开式轴承,闭式轴承内已注入润滑剂,在运转过程中不再采用其他方式进行润滑;开式一般采用油浴、油雾、滴入润滑油等润滑方式进行润滑,且根据滚动轴承的运转速度、承载大小选择相应标号的轴承润滑油,如高速采用低标号润滑油,高负载采用高标号润滑油等。

2.5 加速寿命试验基本假定

滚动轴承加速寿命试验的数据必须在一定假设的基础上才具有可比性,得出的结论才能说明问题。通常的基本假设有以下几个:

- (1) 滚动轴承在正常应力下和加速应力下寿命分布都服从 Weibull 分布;
- (2) 在各个应力水平下滚动轴承的失效机理相同;
- (3) 各个应力水平下滚动轴承的加速模型相同;
- (4) 滚动轴承剩余疲劳寿命仅与当前应力水平和当前已累积失效部分有关,与累积方式无关。

其中前三个为通用假设,最后一个假设主要针对步进等寿命周期中含有不同应力的加速方式提出来的。

2.6 加速模型的确定

加速模型可以写成如下通用公式:

$$\ln \eta = a + b\varphi(S_i) \quad (1)$$

根据 ISO 281^[8] 有

$$L_n = a_1 a_{ISO} \left(\frac{C}{P} \right)^\varepsilon \quad (2)$$

则两边同时取对数:

$$\ln L_n = \left[\ln a_1 a_{ISO} + \varepsilon \ln C \right] + \left[-\varepsilon \right] \ln P \quad (3)$$

加速模型的特征寿命 η 对应于 ISO 281 的特征寿命 L_{63} , 则有 $\eta = L_{63}$; $a = \ln a_1 a_{ISO} + \varepsilon \ln C$; $b = -\varepsilon$; $\varphi(S_i) = \ln P_i$ 。其中: a_1 为寿命调整系数; a_{ISO} 为寿命修正系数; ε 为寿命公式中的幂(球轴承为 3, 滚子轴承为 10/3); C 为基本额定动载荷; P 为当量动载荷。以 skf explorer 6205 轴承为例: $a_1 = 2.67$; $\varepsilon = 3$; $C = 14.8 \text{ kN}$; a_{ISO} 与疲劳负载极限比 P_u/P 、润滑条件 κ 和轴承内润滑油污染系数 η 有关,通常条件下 $\eta \left(\frac{P_c}{P} \right) = 0.05$, 润滑油采用 ISO VG 32, 对于工作在 80℃ 的 6205 轴承来说 $\kappa \approx 0.83$, 则 $a_{ISO} \approx 1.6$ 。最后可知 $a = 9.55$, $b = -3$ 。则加速模型为

$$\ln L_n = 9.55 - 3 \ln P \quad (4)$$

Skf explorer 6205 轴承在上述条件下的应力-寿命曲线如图 2(a) 所示。该应力-寿命曲线在对数坐标系下则更直观,如图 2(b) 所示。

2.7 加速因子的确定

加速因子是不同应力水平的寿命之间的转换因子,它是指在不同应力下,轴承产生相同损伤所需时间的比值。由式(1)和式(2)可得

$$\ln \tau_j = \ln \left(\frac{\eta}{\eta_i} \right) = -\varepsilon (\ln P_j - \ln P_i) = \ln \left(\frac{P_i}{P_j} \right)^\varepsilon \quad (5)$$

则加速因子为

$$\tau_j = \left(\frac{P_i}{P_j} \right)^\varepsilon \quad (6)$$

以上结论均是在理想情况下得到的理论值,存在影响结果准确性的假设。如实际上 a_{ISO} 会随着应

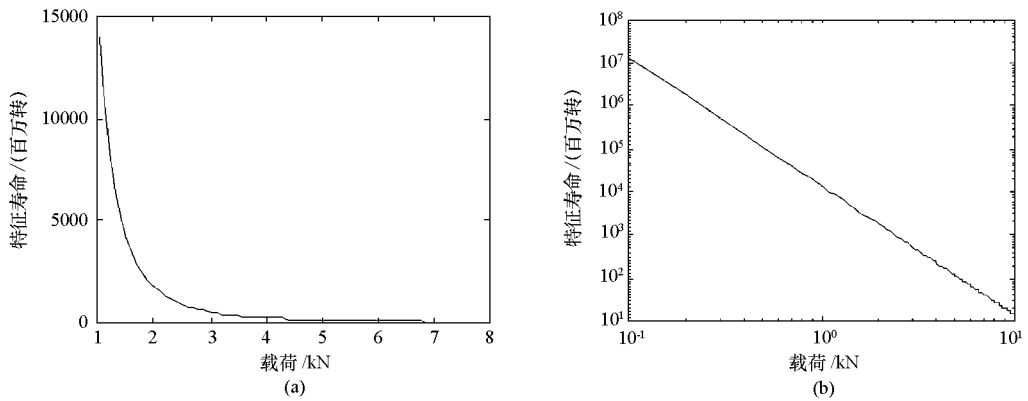


图2 6205轴承应力-寿命理论曲线图

Fig. 2 The theoretic stress-life graph of 6205 bearings

力的增大而减小;以特征寿命代替不同应力下产生相同损伤所需的时间不太合适等。因此,对有充足疲劳寿命试验数据的情况可通过参数估计的方法确定相关参数。

3 试验采集流程

试验和采集流程如图1所示。组装试验轴承并将其安装在试验台上,安装相应传感器,连接自动控制和数据采集设备,开启油泵进行润滑,启动试验台,对于新安装的试验轴承在2小时内分次加至满载荷,对试验过的轴承进行加载时可在1小时内分次加至满载荷,记录相应载荷大小。加满载荷后开启数据采集设备,采集振动信号、温度信号等相关数据,并对如转速、环境温度等没有用于轴承加速寿命试验的应力数据进行全程监控。

在试验过程中,根据试验目的确定是否需要进行停机检查,停机检查时记录相应的停机时间,有条件的情况下可以进行无损探伤检查,记录相应的检查数据和检查结果,继续进行试验,记录继续试验时间。对于能够自动记录时间的试验台可以不记录时间,但必须记录在该时间间隔内对滚动轴承进行了何种检测和相应的检测结果。

由于轴承振动可能出现多种干扰,故此一般在滚动轴承试验过程中,设置超过停机阈值多少次时停机。如超过设定的均方根值阈值30次时停机等。停机后,记录相应的时间,停止数据采集,对试验轴承进行清洗、检查、封存等。

4 试验一致性检验

试验一致性是指为了保证单个产品全寿命周期不同阶段或多个产品相互之间在加速寿命试验中获取的数据具有可比性,必须保证产品在相同的失效机理下疲劳失效而采取的一系列试验条件的限制和失效原因的检验。试验一致性检验对于多组滚动轴承加速寿命试验至关重要,关系到相应的试验结果是否准确,试验数据之间是否能够相互比较等。因此,试验一致性的检验对于多套轴承进行试验时是必不可少的。试验一致性检验的根本目的就是保证试验结束后滚动轴承的失效机理相同。

试验一致性检验包括三部分:试验前一致性检验、试验中一致性检验和试验后一致性检验。

4.1 试验前一致性检验

试验前要保证试验对象、润滑方式和加速应力类型的一致,试验前一致性检验主要包括检验滚动轴承是否存在先天缺陷,试验台加载的准确性,采用的润滑油水分含量等。图3和图4是通过场发射扫描电镜对待测轴承进行检查的结果,图3显示该轴承为完好轴承,而图4表明该轴承已存在划伤。

4.2 试验中一致性检验

试验中一致性检验主要包括应力水平记录,对未用于加速退化应力的应力如转速、温度等进行监测^[6],无法进行实时测量但会影响到滚动轴承寿命的其他因素如润滑油微粒的含量和温湿度等进行监

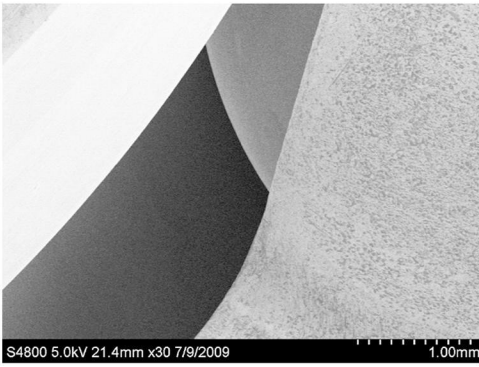


图 3 完好的轴承

Fig. 3 The intact bearing

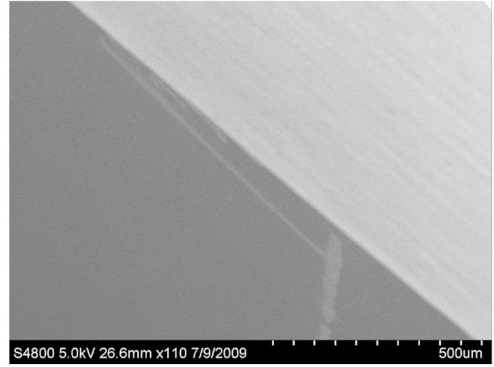


图 4 有划伤的轴承

Fig. 4 The scuffed bearing

测。图 5 为在试验过程中抽取轴承润滑油以备检测,必须标记油样抽取时间并将其与试验轴承编号和试验过程对应起来。图 6 为在试验过程中出现均方根值过大后停机并进行检查以确定故障源。



图 5 抽取润滑油样进行检测

Fig. 5 Pumping out lubricant oil

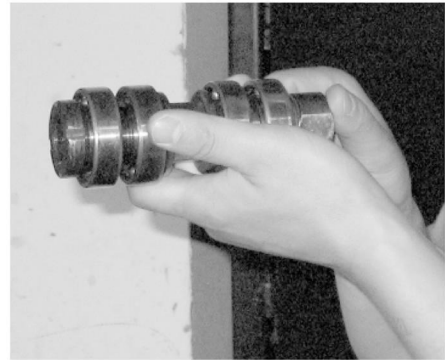


图 6 运行过程中停机检查

Fig. 6 Stopping and detecting

4.3 试验后一致性检验

试验后一致性检验主要包括对滚动轴承失效形式是否一致进行检查。检查方式包括很多种,可以采用扫描电镜检测故障表面,可以对提取的润滑油进行铁谱或光谱分析等。图 7 是通过能谱测出的滚动轴承侧表面的能谱图,从图 7(b)可以看出各元素的含量比例。通过元素的含量确定所测位置的金属形态,如确定是奥氏体还是马氏体。奥氏体和马氏体的转换是微观金属疲劳时存在的现象。

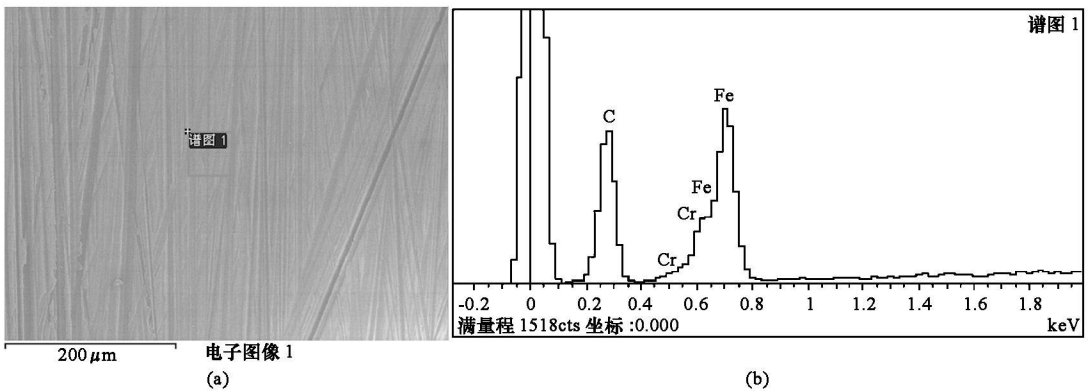


图 7 各元素含量测试

Fig. 7 Elementary content detecting

5 数据分析

滚动轴承加速寿命试验数据的分析方法可以分为两类:一类是根据滚动轴承寿命数据的统计分析方法;另一类是根据滚动轴承运转过程中的振动信号、温度信号和油液监控数据对滚动轴承进行分析的分析方法。表2给出了作者针对40套skf explorer 6205轴承进行寿命试验的统计数据,其中应力4.5kN所在列与其他列重叠的寿命数据为其他应力水平的寿命数据通过理论上的加速因子(式(6))折算到该应力水平下的寿命数据。

表2 试验轴承寿命
Tab. 2 Life of testing bearings

故障 轴承 编号	应力水平(kN)								故障 轴承 编号	应力水平(kN)							
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0		4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
1	228								12	184				61			
2	149								13	123				41			
3	191	139							14	61				20			
4	174	127							15	74				20			
5	56	41							16	73				19			
6	225		123						17	34				9			
7	134		73						18	85						18	
8	37		20						19	32						7	
9	268			113					20	30						6	
10	173			73					21	78							14
11	29			12					22	20							4

注:表中数据为通过加速寿命试验获取的寿命数据,不同应力下的寿命数据通过特征寿命结合加速因子(式(6))进行转换。

5.1 应力-寿命曲线

根据表2给出的数据,可以画出应力-寿命曲线如图8所示。

从图中可以看出,实际的数据拟合曲线与理论曲线并不吻合,其主要原因是理论加速模型中 a_{50} 随着应力的增大而发生变化(一般为减小)。因此,应力寿命曲线常根据寿命试验的结果,通过极大似然估计的方法估计出加速模型中待定系数 a 和 b 的值。

5.2 寿命分布曲线

如表2所示,将各应力下的寿命通过加速因子转换到4.5kN应力水平下,然后通过极大似然估计方法获得在4.5kN应力水平下Weibull分布的相关参数: $\eta_1 = 124.43$; $m = 1.53$,相应的分布函数和概率密度函数如图9、10所示。

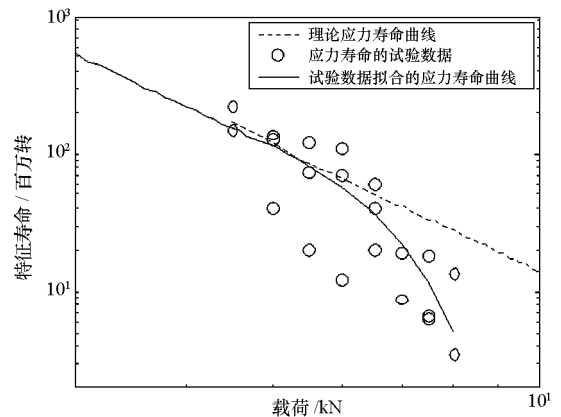


图8 应力-寿命实验曲线

Fig. 8 The stress-life experimental graph

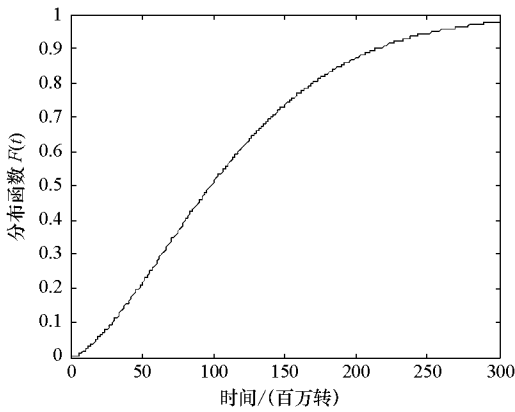


图 9 分布函数曲线
Fig. 9 Distribution function graph

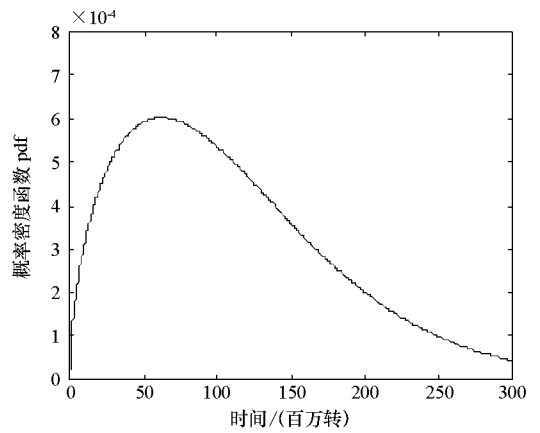


图 10 概率密度函数曲线
Fig. 10 Probability density function graph 6

6 结论

(1) 本文通过对实际滚动轴承加速寿命试验过程的分析, 提出一套滚动轴承加速寿命试验方法, 可以用来指导实际工程中滚动轴承疲劳寿命试验的设计和实施;

(2) 为了保证试验数据之间具有可比性, 提出滚动轴承寿命试验必须进行试验条件一致性检验, 并给出了一致性检验细则和相应的检验方法, 保证滚动轴承的失效机理相同;

(3) 对现行的滚动轴承分析方法进行了总结, 给出典型的滚动轴承加速寿命试验寿命数据的分析方法, 直观地反映试验滚动轴承的寿命分布。

参考文献:

- [1] Yurkowsky W, Schafer R E, Finkelstein J M. Accelerated Testing Technology[R]. Technical Report No. RADC- TR- 67- 420, 1967.
- [2] 陈循, 陶俊勇, 张春华. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(4): 29- 32.
- [3] 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.
- [4] Wang B X. Testing for the Validity of the Assumptions in the Exponential Step-stress Accelerated Life-testing Model[J]. Journal of Computational Statistics and Data Analysis. 2009: 1- 8.
- [5] Harris T A, Kotzalas M N. Advanced Concepts of Bearing Technology(Rolling Bearing Analysis, 5th Edition)[M]. New York: Taylor & Francis, 2006.
- [6] Zhang C, Chuckpaivong I, Liang S Y, et al. Mechanical Component Lifetime Estimation Based on Accelerated Life Testing with Singularity Extrapolation[J]. Journal of Mechanical Systems and Signal Processing. 2002, 16(4): 705- 718.
- [7] JB/T 50013- 2000. 滚动轴承寿命及可靠性试验规程(内部使用)[S]. 中国: 机械工业部洛阳轴承研究所, 2000.
- [8] ISO 281. Rolling Bearings — Dynamic Load Ratings and Rating Life[S]. International Organization for Standardization, 2007.
- [9] ISO 76. Rolling Bearings — Static Load Ratings[S]. International Organization for Standardization, 2006.