

Research on Inverse Accelerated-Life-Test Based on Crowdsourcing Data

Peiran Li, Shengbing Xu*, Shulin Huang, Yingqing Lin, Wei Cai

School of Applied Mathematics, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong
Email: xushengbing111@126.com

Received: May 31st, 2020; accepted: Jun. 15th, 2020; published: Jun. 22nd, 2020

Abstract

With the rapid development of science and technology, the speed of product renewal is getting faster and faster and the people urgently need to obtain the life information of the product in the short time and even in the design phase of the product. The accelerated life test is to carry out the life test of the samples by using the accelerated stress to obtain the life information of the product in the feasible time. But it is difficult for the accelerated life test to obtain the product's life information at the design stage of the product. In order to solve the acquisition problem of product life information in the design phase, this paper proposes the concept and method of the inverse acceleration life test according to the background of big data. This method, which can achieve the target of predicting product life information and reducing the cost of life test, is to establish the inverse accelerated life model of the product based on the relevant product life data under the normal stress of the mode. In this paper, the survival analysis method of the related product life data and product limit is used to establish the Arrhenius life model, and carry out the life evaluation of the heat insulation suit under accelerated stress.

Keywords

Accelerated Life Test, Crowdsourcing Pattern, Arrhenius Model, Inverse Accelerated Life Test, Life Model

基于众包数据的逆加速寿命试验研究

李沛然, 徐圣兵*, 黄枢林, 林映青, 蔡 炜

广东工业大学应用数学学院, 广东 广州
Email: xushengbing111@126.com

收稿日期: 2020年5月31日; 录用日期: 2020年6月15日; 发布日期: 2020年6月22日

*通讯作者。

摘要

由于科学技术的高速发展,产品更新换代的速度越来越快,人们迫切需要在较短的时间内、甚至在产品的设计阶段就能获得产品的寿命信息。加速寿命试验就是利用加速应力开展样品试件的寿命试验,从而在可行的时间内获得产品的寿命信息。但加速寿命试验仍然无法在产品的设计阶段获取产品的寿命信息。为解决设计阶段的产品寿命信息获取问题,本文提出了基于大数据背景的逆加速寿命试验概念和方法。该方法主要基于众包模式获取的常规应力下的相关产品寿命数据,建立产品的逆加速寿命模型,从而达到预测产品寿命信息和降低寿命实验成本的目标。以隔热服为例,本文利用在电商平台采集的相关产品寿命数据和乘积限生存分析方法,建立阿伦尼斯寿命模型,并开展隔热服在加速应力下的寿命评估。

关键词

加速寿命试验, 众包模式, 阿伦尼斯模型, 逆加速寿命试验, 寿命模型

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科学技术的不断发展,高质量、长寿命、高可靠的试样产品寿命评估成为一个广受关注的课题。按传统的寿命试验技术评估试样寿命,寿命试验则很难在可行的时间内完成。为此,Yurkowsky W.等人在1967年首次提出加速寿命试验(Accelerated Life Test, ALT) [1]方法。ALT方法通过在不改变试样失效机制的前提下,适当提高诱发其失效的应力条件,从而使产品加速失效或退化[2]。随着加速寿命试验的深入研究,目前加速寿命类型主要分为恒定应力、步进应力、和序进应力[3],其相关成果已被我国广泛应用到半导体[4] [5] [6]、机械电子[7] [8] [9] [10]、航天[11] [12]等各个领域。

加速寿命试验研究主要都是基于非常规应力不同的加速方式开展相关的试验设计和研究。其主要目标是解决常规应力下试样寿命数据采集周期长的瓶颈问题。常规应力下试样寿命数据采集周期长,但非常规应力下试样寿命数据采集成本一般也偏高。随着大数据时代的发展,借助网络采集方式,使得某些产品常规应力条件下寿命数据采集难的问题迎刃而解。JeffHowe于2006年在《连线》杂志上首次提出了“众包”的概念[13],即指一个公司或机构把过去由员工执行的工作任务,以自由自愿的形式,外包给非特定大众网络。通过众包模式,数据采集的任务难度进一步降低,并且有效降低了数据采集的成本[14] [15] [16] [17],尤其是对于一些放置在日常环境中的产品,产品使用人往往掌握这些产品的寿命数据信息而因信息的单一性无法有效地把它们利用起来。

本文受众包模式的启发,借助网络数据采集方法和加速寿命试验思想,提出了基于常规应力下寿命信息的逆加速寿命试验方法。该方法利用已知的常规应力下的相关产品寿命信息,建立待设计样品的寿命试验模型。以隔热服为例,本文利用在电商平台采集的相关产品寿命数据和乘积限生存分析方法,建立阿伦尼斯寿命模型,并开展隔热服在加速应力下的寿命评估。

2. 逆加速寿命试验动机

为了评价产品的寿命特征,提取产品的各项可靠性指标,研究产品的失效机制,都要进行寿命试验。

寿命实验一般是指把若干样品放在观测应力 C (如温度、湿度、电压、电流、功率、振动、负载等工作条件) 的若干个应力水平下进行的试验, 通过观察每个样品的对应使用寿命 T (样品第一次失效发生的时间), 建立带参数 θ 的寿命模型 $T(C; \theta)$ (如图 1 寿命试验示意图所示)。

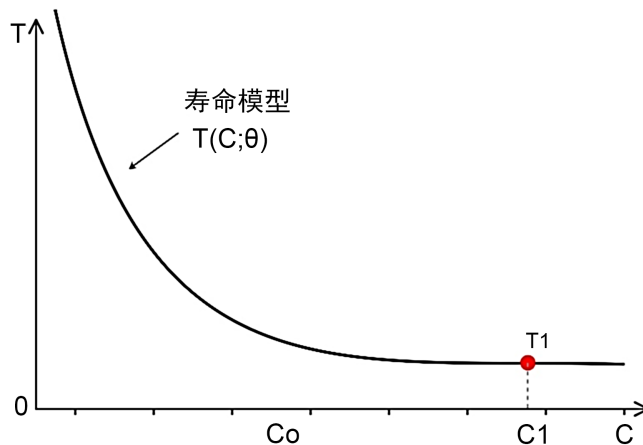


Figure 1. Schematic diagram of life test
图 1. 寿命试验示意图

寿命试验一般分为现场寿命试验和模拟寿命试验[18]。现场寿命试验是指把样品放在实际应用条件下来获取失效数据的试验。这种现场试验最有说服力, 但其投资大、时间长、管理工作负担大。模拟寿命试验是指将现场使用的工作条件在实验室内模拟, 并人工设计应力水平来获取失效数据的试验。模拟寿命试验投资小、有重复性、管理简便, 便于产品之间的比较, 工程界大都采用这种试验获取寿命模型。

正常应力水平条件下, 样品的使用寿命比较长, 导致观测难度大。所以工程界一般采用超过正常应力水平下的寿命试验, 对应试验称之为**加速寿命试验**。假设 C_0 为正常应力水平与超过正常应力水平的分界阈值, 从而把应力区域分割为 $D_1 = \{C | C \leq C_0\}$ 和 $D_2 = \{C | C > C_0\}$ 两部分。加速寿命试验为只采用 D_2 区域内的应力水平开展的试验, 由此我们称 D_2 为**加速寿命试验区**(如图 2 寿命试验区示意图所示)。如果试验只采用 D_1 区域内的应力水平开展对应的寿命试验, 我们则称对应寿命试验为**逆加速寿命试验**, 相应的区域 D_1 称为**逆加速寿命试验区**(如图 2 寿命试验区示意图所示)。

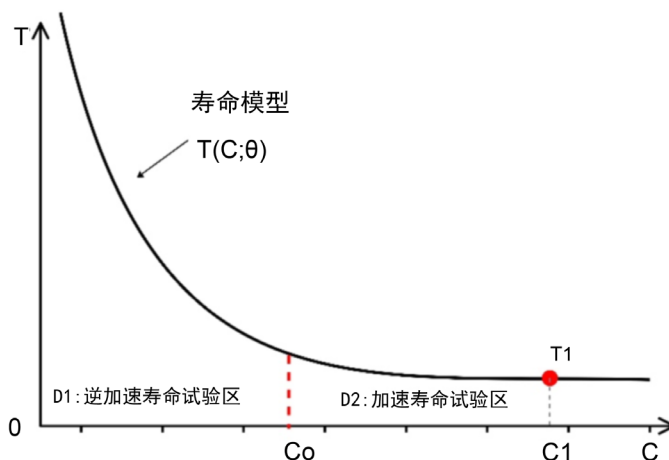


Figure 2. Schematic diagram of life test area
图 2. 寿命试验区示意图

2.1. 加速寿命试验

加速寿命试验的主要任务就是利用加速寿命试验区的应力水平下样品寿命观测值来估计参数 θ ，从而建立**加速寿命模型** $T(C;\theta)$ 。根据加速寿命模型，可以外推正常应力水平下的产品寿命和其它可靠性指标(如图3加速寿命试验示意图所示)。

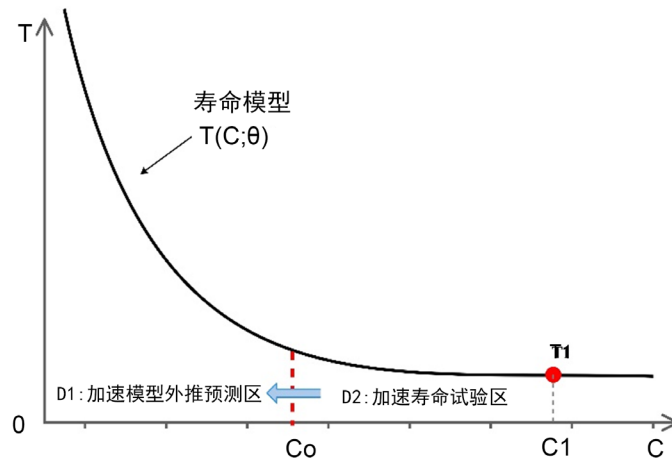


Figure 3. Schematic diagram of accelerated life test
图3. 加速寿命试验示意图

2.2. 逆加速寿命试验

逆加速寿命试验的主要任务就是利用逆加速寿命试验区的应力水平下样品寿命观测值来估计参数 θ ，从而建立**逆加速寿命模型** $T(C;\theta)$ 。根据逆加速寿命模型，可以外推超过正常应力水平下的产品寿命和其它可靠性指标(如图4逆加速寿命试验示意图所示)。

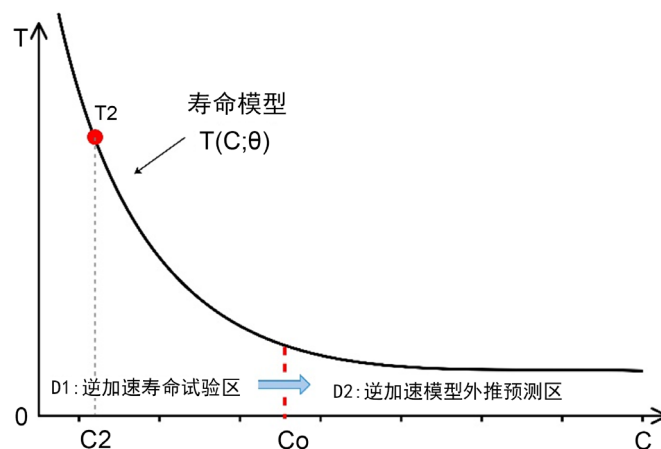


Figure 4. Schematic diagram of inverse accelerated life test
图4. 逆加速寿命试验示意图

2.3. 众包模式

加速寿命试验为了获取超过正常应力条件下的数据，需要在实验室做对应实验以观测产品在不同超过正常应力下的寿命。如对最常见的应力条件有温度，加速寿命试验为了让产品提早老化，往往采取高

温实验的方式以收集高温条件下的数据, 通过设置不同的温度值, 可以得到不同温度下的寿命数据, 从而拟合寿命曲线并预测常规温度下的产品寿命(如图 5 温度加速寿命试验建模原理图所示)。

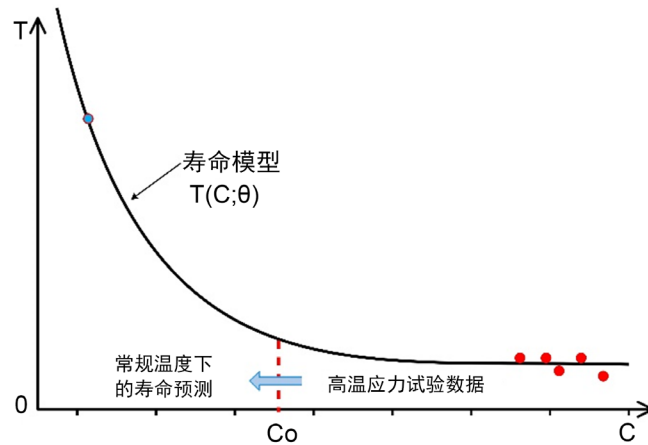


Figure 5. Schematic diagram of temperature accelerated life test modeling

图 5. 温度加速寿命试验建模原理图

逆加速寿命试验不再局限于传统意义上的实验室观测数据, 而是应用大数据的思维将相关或类似产品实际使用寿命数据信息通过互联网众包任务来采集。每一个相关或类似产品用户在众包平台上发布这些产品寿命信息及产品所处环境信息, 由众包平台汇总常规应力水平下的寿命数据。

把这些由众包平台采集到的数据进一步加工处理, 然后根据加工处理后的常规应力水平下的数据建立逆加速寿命模型, 从而达到预测产品在超过正常应力水平下的使用寿命(如图 6 逆加速寿命试验建模原理图所示)。

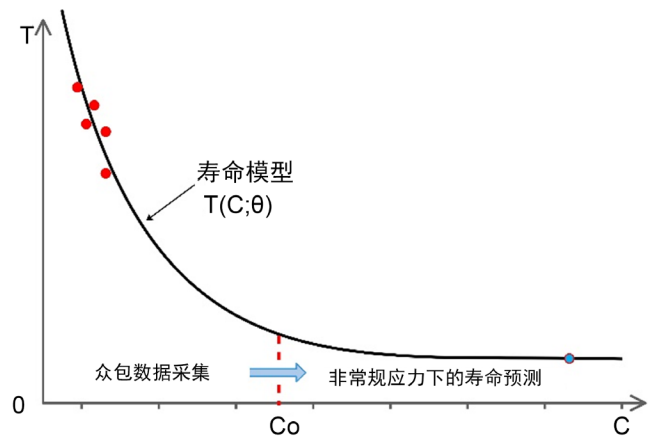


Figure 6. Schematic diagram of inverse accelerated life test modeling

图 6. 逆加速寿命试验建模原理图

3. 逆加速寿命模型的建立

3.1. 阿伦尼斯模型

产品寿命结束的标志点在于其特性退化至失效, 这是因为构成产品物质的分子或原子在化学或物理等外部因素下随着时间发生了不良变化。当反应速度越快, 则产品寿命越短。阿伦尼斯在 1889 年的温度

对酸催化蔗糖水解转化反应实验中, 总结得出了某产品的性能退化速率与激活能的指数成反比, 与温度倒数的指数成反比[19]。

后进一步发展成为阿伦尼斯模型:

$$N = Ae^{E/KT} \quad (1)$$

其中, N 表示温度为 T 时的寿命特征; A 为常数, 由实验数据决定; E 为激活能, 与材料的性质有关, 单位 eV; K 为玻耳兹曼常数, 为 8.617×10^{-5} eV/K, T 是绝对温度, E/K 又称为激活温度。

为了方便后续参数估计, 对模型等式两边取对数并线性变换, 从而得到:

$$\begin{cases} \ln N = a + b/T \\ a = \ln A \\ b = E/K \end{cases} \quad (2)$$

其中 a , b 为待估参数。

阿伦尼斯模型在加速寿命试验的研究中已被广泛应用, 它同样适用于逆加速寿命试验。

3.2. 乘积限估计(K-M 估计)

为了建立原始寿命数据与地区温度的关联, 需要先得到各地区的寿命期望, 因此本文使用乘积限估计的方法估算每个地区的寿命期望值。

首先定义生存函数 $S(t)$ 的乘积限估计为:

$$\hat{S}(t) = \begin{cases} 1, l \in [0, l_{(1)}) \\ \prod_{i=1}^j \left(\frac{n-i}{n-i+1} \right), l \in [l_{(j)}, l_{(j+1)}), j = 1, 2, \dots, n-1 \\ 0, l \in [l_{(n)}, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

其中 l_i 是表示总体 L 的 n 个个体寿命的观测, 得到 l_1, l_2, \dots, l_n (其中可能有右删失数据, 但无左删失数据), 将这些 l_i 从小到大重排得: $l_{(1)}, l_{(2)}, \dots, l_{(n)}$ 。

而对寿命的估计式为:

$$EL \approx l_{(1)} + \sum_{i=1}^{n-1} \hat{S}(l_{(i)}) (l_{(i+1)} - l_{(i)}) \quad (4)$$

再令 $N = EL$ 。

4. 数据实验

我们借 2018 年全国大学生数学建模竞赛 A 题高温作业专用服装设计问题的背景, 探讨基于众包数据的逆加速寿命试验与建模问题。

4.1. 数据收集

通过淘宝、京东等电商平台, 我们很容易爬取到隔热服寿命的相关数据。采集的部分数据如表 1 所示。

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 部分原始数据表

| 地点 | 商家公司 | 寿命 |
|-------|--------------|--------|
| 浙江 衢州 | 东安消防装备技术有限公司 | 3~5 年 |
| 北京 北京 | 黎卫士五金旗舰店 | 10 年以上 |

Continued

| | | |
|-------|-------------|--------|
| 江苏 东台 | 业安劳防旗舰店 | 3~5 年 |
| 浙江 温州 | 米卡邦汽车用品专营店 | 10 年以上 |
| 江苏 六合 | 南京谋福贸易有限公司 | 5 年 |
| 上海 上海 | 梦福美五金工具专营店 | 10 年 |
| 南京 六合 | 南京厚竹有限公司 | 3~4 年 |
| 江苏 苏州 | 淮海旗舰店 | 5 年 |
| 山东 济南 | 节假日网络科技有限公司 | 1~2 年 |

通过对厂家给出的数据信息，我们可以对采集的数据进行处理并列出生存曲线。根据我国气候特征，我们把这些原始数据按照广东、江浙、川渝、山东、东北五个地区汇总加工处理。基于寿命表，我们可以绘制得出隔热服的生存曲线(如图 7 各地区隔热服寿命曲线图所示)。

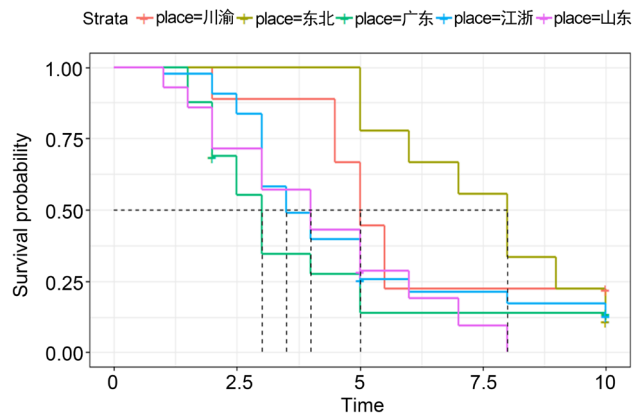


Figure 7. Life curve of thermal insulation clothing by region
图 7. 各地区隔热服寿命曲线图

4.2. 数据检验

由于数据源自不同厂家的经验数据，因此需要作差异性检验以判断数据的有效性。选取东北和华南的数据进行检验。

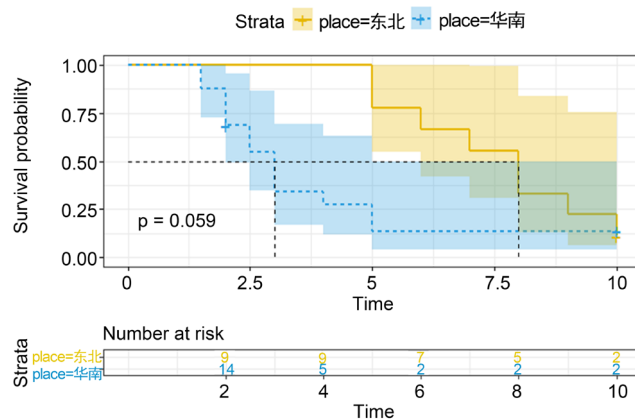


Figure 8. Life data inspection chart
图 8. 寿命数据检验图

如图 8 寿命数据检验图所示, 可以直观看出: 1) 东北和华南两个地区的隔热服寿命数据具有明显的差异性; 2) 在东北地区, 隔热服寿命曲线下降速度较缓慢, 相对而言, 华南地区的寿命曲线下降急速; 3) 取 0.1 的置信水平, 显著性 p 值为 0.059, 低于 0.1, 因此在统计意义下可以认为两者存在显著差异。

4.3. 模型求参

利用乘积限估计, 可以算得各地区的寿命期望值; 通过查阅气象局数据, 可以得到各地区的平均气温。其相关数据如表 2 处理后的寿命数据及对应地区温度表所示(逆加速寿命试验的温度应力水平数据)。

Table 2. Processed life data and corresponding regional thermometer

表 2. 处理后的寿命数据及对应地区温度表

| 地点 | 寿命期望(年) | 温度(K) |
|----|---------|---------|
| 广东 | 3.8625 | 295.65 |
| 山东 | 4.1786 | 286.275 |
| 江浙 | 4.8023 | 290.15 |
| 川渝 | 5.7778 | 286.775 |
| 东北 | 7.5556 | 281.775 |

阿尔尼斯模型经转换简化后可以利用最小二乘法快速求参, 即目标任务转化为:

$$\min_{a,b} \sum_{i=1}^n (\ln N_i - a - b/T_i)^2 \quad (5)$$

最终求得 $\hat{a} = 14.17$, $\hat{b} = 3217.87$ 。残差平方和为 0.002341, 数值较小, 说明拟合效果良好。将参数代入原模型中, 可得出阿伦尼斯模型为:

$$N = 1425453 \cdot e^{3217.87T} \quad (6)$$

4.4. 预测分析

通过常温下的隔热服寿命数据, 预测得到了带参数的寿命模型, 代入高温环境下的温度值, 可以得到在这些温度下的寿命(承受时间, 如表 3 寿命数据预测表所示)。

Table 3. Life data prediction table

表 3. 寿命数据预测表

| 温度 | 寿命(min) |
|-----|----------|
| 120 | 561.7545 |
| 125 | 276.4264 |
| 130 | 129.4491 |
| 135 | 57.38111 |
| 140 | 23.9278 |
| 145 | 9.3195 |
| 150 | 3.3622 |

5. 结论

通过加速寿命试验, 我们可以利用对产品的超过正常应力水平条件下的实验来估计其在正常应力水平下的使用寿命, 实验时间比较短, 适用于有样品存在的情形, 但不适用于产品预研制情形; 在互联网、大数据的背景下, 本文提出了逆加速寿命试验方法, 从而使得相关产品的实际使用寿命数据(逆加速寿命试验的应力水平下的观测数据)产生利用价值, 可以降低新产品预研成本。我们通过互联网收集常规应力水平下的相关或相似产品寿命数据, 进而估计待研究产品在超过正常应力水平条件下的耐用时间, 节省了对产品做加速寿命实验的成本。

基金项目

2019 年大学生创新创业训练计划项目“逆加速寿命试验研究”(项目编号: xj201911845399)。

参考文献

- [1] Yurkowsky, W., Schafer, R.E. and Finkelstein, J.M. (1967) Accelerated Testing Technology. Technical Report No. RADC-TR-67-420, 1-2.
- [2] Wang, Q.Y. (2008) Accelerated Testing Method and Its Application in Super Long Life Fatigue of Materials. *Abstract Proceedings of the International Conference on Experimental Mechanics*, Nanjing, 8 November 2008, 1.
- [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] 卫红. 塑料管壳优于普通管壳[J]. 半导体情报, 1971(6): 61-62.
- [5] 吴来安. 国外半导体器件可靠性基本概念及试验方法(下)[J]. 半导体情报, 1973(7): 1-14.
- [6] 郑鹏洲. 贝尔公司对于半导体器件可靠性的研究[J]. 微电子学与计算机, 1975(1): 28-74.
- [7] 秦绍铭. 由加速寿命试验来推算电子器件寿命[J]. 机车电传动, 1977(5): 23-27.
- [8] 陈惠民. 潜水电机绕组线的加速寿命试验[J]. 电线电缆, 1981(2): 25-27+19.
- [9] 葛世荣. 提升机衬垫磨损寿命加速试验与预测[J]. 矿山机械, 1991(7): 20-22.
- [10] 许伟昌. 汽车灯寿命加速指数的计算[J]. 中国照明电器, 1994(2): 27-28.
- [11] 二二二厂加速试验课题组, 北京航空学院余度技术课题组. 航空陀螺电机的加速寿命试验与可靠性研究[J]. 航空标准化, 1983(5): 15-21.
- [12] 李铁柏. 中国航空学会可靠性工程学术交流会议[J]. 航空学报, 1987(4): 214.
- [13] Howe, J. (2006) The Rise of Crowd Sourcing. *Wired*, **14**, 176-183.
- [14] 冯剑红, 李国良, 冯建华. 众包技术研究综述[J]. 计算机学报, 2015, 38(9): 1713-1726.
- [15] 张利斌, 钟复平, 涂慧. 众包问题研究综述[J]. 科技进步与对策, 2012, 29(6): 154-160.
- [16] 魏拴成. 众包的理念以及我国企业众包商业模式设计[J]. 技术经济与管理研究, 2010(1): 36-39.
- [17] 谭婷婷, 蔡淑琴, 胡慕海. 众包国外研究现状[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2011, 33(2): 263-266.
- [18] 茆诗松. 从寿命试验到加速寿命试验[J]. 质量与可靠性, 2003(1): 8-12.
- [19] 林震, 姜同敏, 程永生, 胡斌. 阿伦尼斯模型研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005(6): 12-14.