

CCNP

商用汽车与工程机械新能源动力系统
产业技术创新战略联盟标准

T/CCNP x-xxxx

液压元件加速寿命试验方法及评价

201x-xx-xx 发布

201x-xx-xx 实施

商用汽车与工程机械新能源动力系统产业技术创新战略联盟 发布

目 次

| | |
|------------------|----|
| 前 言 | II |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件..... | 1 |
| 3 术语和定义..... | 1 |
| 4 符号和缩略语..... | 2 |
| 5 加速寿命试验概述..... | 2 |
| 6 加速寿命试验的设计..... | 3 |
| 7 加速寿命试验终止..... | 6 |
| 8 试验数据分析..... | 6 |
| 9 试验报告..... | 7 |
| 附录 A..... | 9 |
| 附录 B..... | 12 |

前 言

本文件根据GB/T1.1-2020起草

本文件规定了液压元件可靠性加速试验评估通用技术规范。

本文件由商用汽车与工程机械新能源动力系统产业技术创新战略联盟提出。

本文件由商用汽车与工程机械新能源动力系统产业技术创新战略联盟标准委员会归口。

本文件主要起草单位：山东大学

本文件主要起草人：李世振、吉晨、高泽坤、潘鑫

本文件首次发布。

液压元件加速寿命试验方法及评价

1 范围

本文件规定了液压元件的加速寿命试验的术语和定义、试验方法、试验设计和数据处理。

本文件适用于GB/T 17446中定义的液压元件。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文件，其最新的版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 5080.1-2012 可靠性试验 第1部分：试验条件和统计检验原理（IEC 60300-3-5: 2001, IDT）

GB/T 17446 流体传动系统及元件 词汇

GB/T 34986-2017 产品加速试验方法（IEC 62506: 2013, IDT）

GB/T 34987-2017 威布尔分析（IEC 61649: 2008, IDT）

GB/T 35023-2018 液压元件可靠性评估方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

百分位寿命 Bx Life

给定元件或组件失效百分比为 x%所对应的时间或循环次数。例如，B10 寿命表示 10%样品失效的时间。

3.2

加速因子 Acceleration Factor

元件在预期使用应力条件下与加速试验应力水平下产品寿命的比值。

3.3

加速寿命试验 Accelerated Life Test

通过对元件施加较高的应力水平，使得元件相比正常使用条件下更快地失效，以快速获取元件可靠性或寿命指标的试验方法。

3.4

失效机理 Failure Mechanism

作用于构成元件的材料，使材料瞬间或持续受到损伤的物理或化学过程。

3.5

失效模式 Failure Mode

失效机理作用下，元件功能丧失或退化的表现形式。

3.6

失效率 Failure Rate

某时刻尚未失效的元件在该时刻发生失效的概率

3.7

高加速极限试验 Highly Accelerated Life Test

在规定的应力下，用于找出产品最有可能出现的失效模式的试验或试验序列。

3.8

加速寿命试验模型 Model For Accelerated Life Testing

包含元件寿命分布模型与寿命-应力模型。典型的元件寿命分布模型如：威布尔分布模型，指数分布模型等；典型的寿命-应力模型如：Arrhenius 模型，逆幂律模型等。

3.9

正常使用条件 Normal Use Conditions

元件在现场工作中所处的环境与条件。

3.10

终止循环计数 Termination Cycle Count

某个样本的试验指标首次达到阈值时所经历的应力循环数。

3.11

删失数据 Censoring Data

由于某种原因被截断了的数据。

3.12

搁置数据 Suspended Data

在没有出现关联失效之前试验即被终止的样品寿命数据。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

- 4.1 B_{10} : 预期 10%的元件发生失效的时间
- 4.2 η : 威布尔分布的尺度参数（特征寿命）
- 4.3 β : 威布尔分布的形状参数
- 4.4 $F(t)$: 累积分布函数
- 4.5 $f(t)$: 概率密度函数

5 加速寿命试验概述

在开展加速寿命试验之前，首先应估算元件在正常使用工况条件下承受的应力水平，其次确定加速试验中施加的应力水平，最后确定每个应力水平下测试的样本数量；在开展加速寿命试验中，加速应力不应超过使试验样品的物理或化学特性发生改变的水平。在加速寿命试验中观察到的失效模式，应与元件在正常工作条件下的失效模式相同。

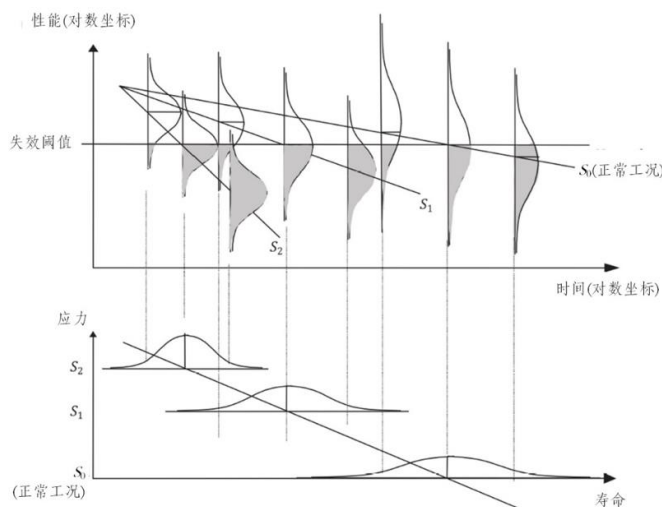


图 1：加速试验与正常工况下寿命的关系

明确元件在试验条件下与预期工况条件下的可靠性指标的关系。通过将一系列加速寿命试验的结果外推，并与预期正常工况条件下的试验结果相比较得到。加速试验与正常工况下寿命的关系如图 1 所示，其中 S_0 表示正常工况条件下元件的失效分布。提高应力后的失效分布记为 S_1 和 S_2 。图一中应力-寿命坐标图的直线显示了加速试验中元件寿命与正常工况寿命的关系。

6 加速寿命试验的设计

6.1 正常使用工况

通过对现场实际工作过程的测试、分析和评估，确定元件的正常使用工况条件，并将该条件下的可靠性量值作为加速寿命试验的评估目标，如表 1 所示。

表 1 元件的参数

| 参数 | 标称值 | 工况值 | 试验值 |
|----|-------------------|-------------------|-------------------|
| 压力 | 1000 kPa (10 bar) | 630 kPa (6,3 bar) | 630 kPa (6,3 bar) |
| 温度 | 70 °C | 50 °C | 50 °C |
| 电压 | 24 V | 24 V | 24 V |
| 流量 | 200L/min | 120L/min | 120L/min |

6.2 预试验

通过预试验可得到加速寿命试验的最高应力水平，主要步骤如下：

- 近似地估算一个可在时长 1 天的试验中造成失效的应力水平；
- 降低第 a) 步中的应力水平至 90%，对至少 2 个样品施加该应力进行测试，直至失效。
- 检查第 b) 步中样品的失效模式是否与正常使用条件下的失效模式相同。若失效模式不同，则继续降低应力水平至 90%，并重复第 b) 步与第 c) 步，直至观察到的失效模式与正常使用条件下相同。此时的应力水平记为 S_1 。
- 将第 b) 或第 c) 步中采用的应力再降低 10% 至 20%，并在该应力下测试至少 2 个样品直至失效。

检查样品的失效模式是否与正常使用条件下的失效模式相同。若失效模式不同，则继续将应力水平降低 10% 至 20% 并重复试验，直至失效模式与正常使用条件下相同。此时的应力水平记为 S_2 。如图 2 所示。

- e) 在威布尔坐标中绘制 c) 和 d) 试验中发现的目标失效模式的失效分布曲线并确定其特征寿命。以应力值为横坐标将两个失效分布曲线绘制在坐标图中，确定曲线符合的模型，如果曲线特性符合阿伦尼斯模型时，则坐标图为对数-线性坐标，如果曲线特性符合逆幂律模型，则坐标图为对数-对数坐标。
- f) S_3 的应力水平比 S_2 更低，可通过 S_1 、 S_2 的试验结果外推估算，如图 2 所示。也可以通过使用 S_1 和 S_2 的平均值来估计， $S_3 = (S_2 - S_1) / 2$ 。
- g) 采用应力水平 S_3 ，测试至少两个样品，并如上述检验样品的失效模式是否与正常使用条件下的失效模式相同。

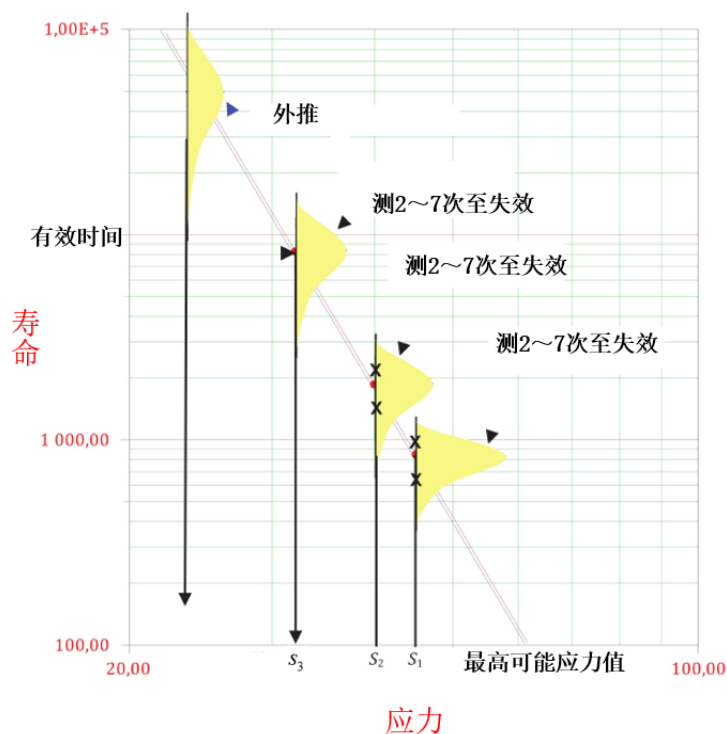


图 2：确定应力水平的图形解释

上述的预试验可能需要重复多次，以获得必要的应力剖面信息。

6.3 加速应力剖面

采用 6.2 中确定的应力水平 S_1 、 S_2 、 S_3 ，对随机选取的一组样本进行加速试验。加速试验采用的应力水平通常高于元件的额定工作条件，因此试验中必须对所有失效样品进行检查，确定其失效模式与正常使用条件下相同。若某一样品的失效模式不同于正常使用条件下的失效模式，则将其作为删失数据处理，或改变试验条件并重新开始试验。

6.4 样本数

理想情况下，对于加速寿命试验的每个应力水平，均应测试至少 7 个样品。但由于较高的应力水平下样品的失效率更高，可遵循测试样品数量与应力水平成反比的原则。对于三个依次降低的应力水平 S1、S2、S3，推荐采用 1: 2: 4 的样本数比例。测试样品的成本较高时，可对 S1、S2 分别测试 4 个样品，并对 S3 测试 5 个以上样品。

6.5 试验应力施加方式

本规范中，加速寿命试验均采用恒定应力。如下图 3 所示

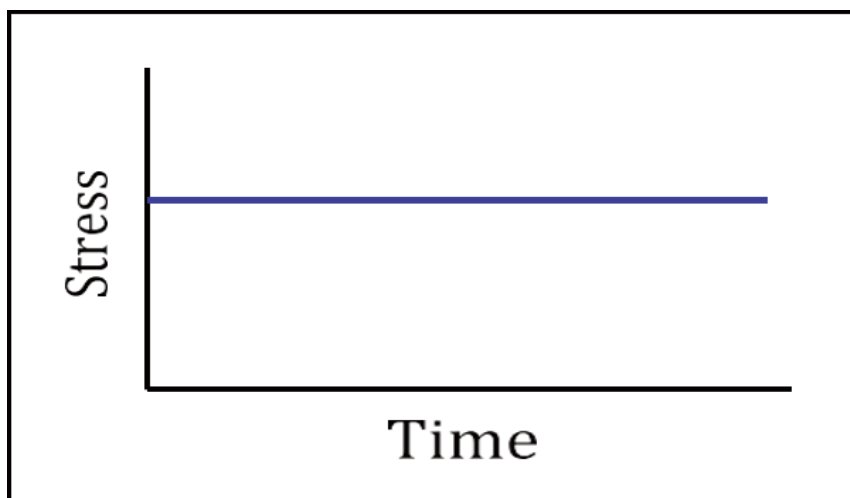


图 3：应力时间图

在现场实际使用中，元件所承受的应力水平也可能是时变的。下列的步骤可用于加速寿命试验中对时变实际使用条件的处理：

- a) 首先，应确定被试元件在实际使用中承受的载荷谱。
- b) 计算加速寿命试验中的等效载荷，可采用 Palmgren-Miner 线性累积损伤法。
- c) 确定一种阶跃应力加载方法，以确定结构的破坏极限和屈服点。
- d) 定义使用破坏极限、操作极限（或弹性极限）和应变-应力曲线的规格极限（比例极限）。
- e) 通过加速寿命试验曲线确定加速应力水平。在机械工程领域，工业上常用的过应力水平分别为 120%、133%和 150%。
- f) 通过逐步过程和给定程序确定应力水平。然后可以在三个加速应力水平下进行加速寿命试验。
- g) 在估计可靠性特征之前，使用概率图检查加速试验的验证。如果在每个加速应力水平上绘制的数据拟合线平行，则意味着假设的寿命分布是适当的，加速应力是有效的。
- h) 检查所考虑模型的估计值与实际测试结果之间的误差。首先，检查从考虑的模型中获得的形状参数与正常使用条件下的测试结果是否相同。其次，从测试结果中检查所考虑模型的比例参数是否在比例参数的置信区间内。最后，如果所考虑的模型的比例参数在置信区间内，则可以判断所考虑的模型的特征寿命和试验结果在统计上没有差异。

7 加速寿命试验终止

7.1 最小失效样本数

在每个应力水平的试验中，应获得至少 4 个有效的样品失效数据，以计算拟合结果的置信区间。

7.2 删失数据与搁置数据处理

删失数据与搁置数据可以采用相同的方法处理，具体的数据处理方法参见附录 A。

8 试验数据分析

8.1 寿命分布

对于液压元件，通常采用威布尔分布模型。威布尔模型的尺度参数 η 表征了被试元件的特征寿命， η 随应力水平的变化而变化，而形状参数 β 则应在不同的应力水平下保持不变。

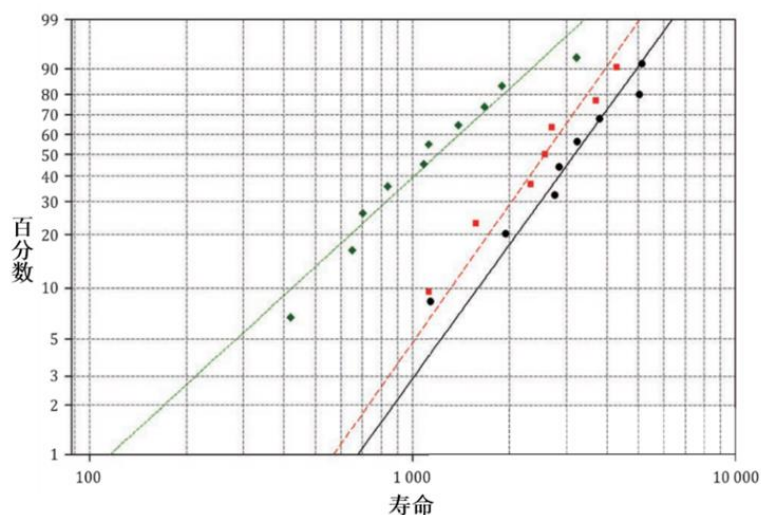


图 4：原始数据的最佳拟合斜率

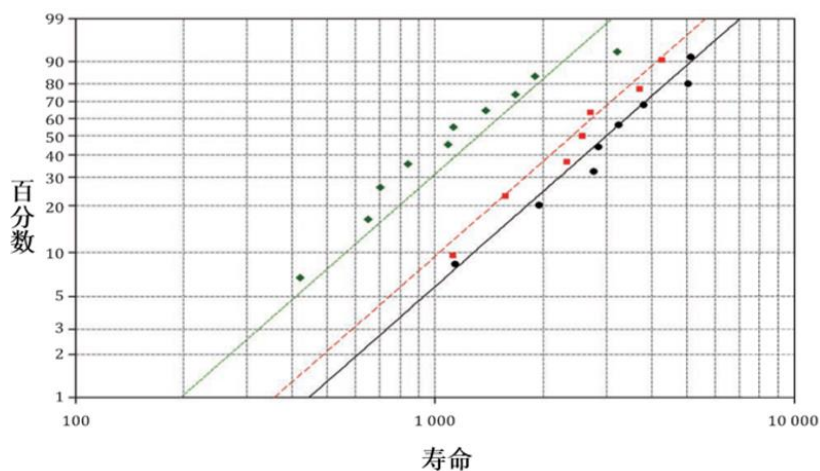


图 5：重新拟合的各斜率

以威布尔分布模型为例，将所有应力水平的测试数据绘制在同一个坐标系中，并将每一个应力水平的数据拟合为一条直线，如图 4 所示。若拟合的各条直线相互不平行（即斜率 β 不同），则应寻找一个统一的、拟合程度可接受的斜率，并对采用统一斜率的拟合结果进行威布尔分布拟合检验，如图 5 所示。

所得分布通过相应的统计分析进行验证。如果每个加速应力水平的绘图数据拟合的线都是平行的，则意味着每个应力水平的失效机制是相同的，并且为加速试验选择的应力水平是合适的。

8.2 加速模型

加速模型又称寿命-应力模型，给出元件特征寿命与应力水平的关系。本文主要使用的是逆幂律模型，参见附录 B。

8.3 数据分析与参数估计

使用选定的寿命-应力关系模型，使用阿伦尼斯模型估计寿命-应力分布的参数。如下图所示：

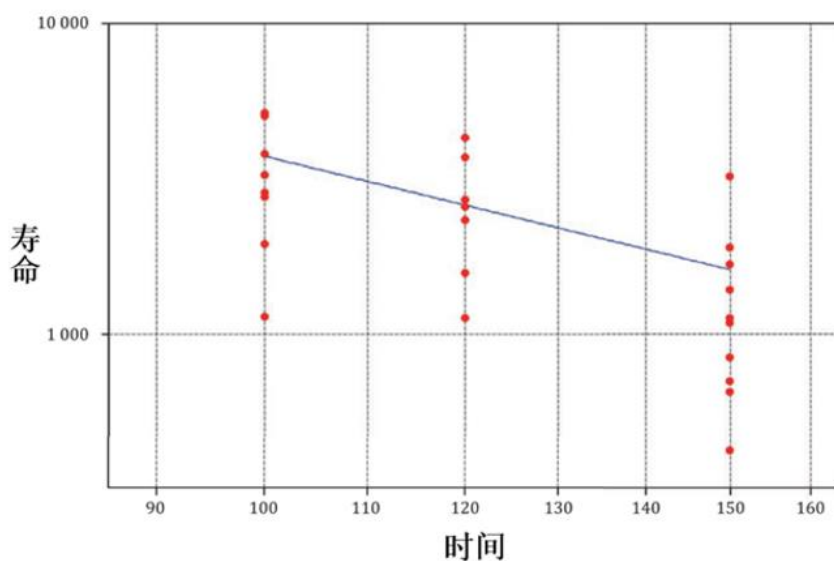


图 6：从图 5 中的数据得到的阿伦尼斯曲线图

在图 6 中，单个点是原始数据点，连接线连接每个应力水平的特征寿命。

确定加速因子。从正常使用寿命与任何加速条件下的寿命的简单比值中确定加速因子 (AF)。如下所示：

$$AF = \frac{L_U}{L_A} \dots\dots\dots(1)$$

式中：

L_U ：正常应力水平下的寿命

L_A ：加速应力水平下的寿命

9 试验报告

试验报告至少应包括以下内容：

- 本规范的编号；
- 完成报告的日期；
- 被试元件情况（制造商，型号，序列号，生产日期）；

- d) 试验样本数;
- e) 试验条件 (加速应力, 应力水平数量, 应力施加方式等);
- f) 失效判定阈值;
- g) 威布尔分布形状参数 (β);
- h) 每个被试样品的失效模式;
- i) 正常使用条件下的 B10 寿命, 以及 95%置信水平下的置信区间;
- j) 正常使用条件下的特征寿命 (η);
- k) 纳入分析的失效样品数量;
- l) 威布尔分布参数的计算方式 (如最大似然估计);
- m) 应用的加速寿命试验模型 (如阿伦尼斯-威布尔, 逆幂律-威布尔等);
- n) 加速因子;
- o) 应用的加速模型中包含的其他参数;
- p) 其他需要说明的事项。

附录 A (资料性)

删失数据与搁置数据处理

A.1 删失数据与搁置数据可以采用相同的方法处理，具体的删失数据的计算示例如下所示：

考虑在每个应力水平下对 10 个试验单元的样品进行加速寿命试验。应力水平为 630KPa、900KPa 和 1200KPa。

逆幂律和威布尔参数从最大似然估计中确定。结果用威布尔图表示，如图 A1 所示。

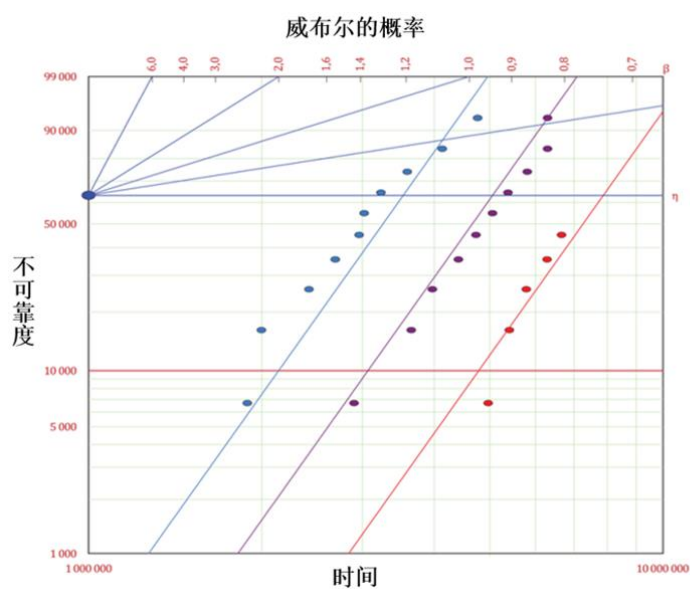


图 A.1：逆幂律威布尔可靠性示意图

从图 A1 中可以近似估计三个应力水平下的形状参数和尺度参数。

与应力（压力）水平相对应的特征寿命可通过图 A2 获得。

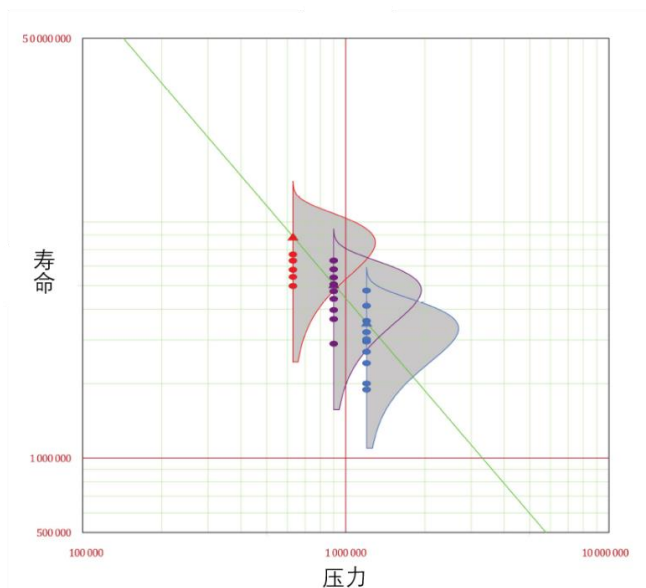


图 A. 2: 寿命与压力图

用软件计算的逆幂律威布尔模型的结果是：

$$K = 4.1452E-8 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$n = 1.2453 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\beta = 4.5 \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中：

K 、 n ——模型参数 ($k>0, n>0$)；

β ——威布尔分布的形状参数；

逆幂律威布尔模型可通过将 K 、 n 和应力水平放入相应的公式中获得。如果正常使用条件下的应力为 630kPa，则标度参数估计为：

$$L = \frac{1}{0.000000041452 \times 630^{1.2453}} = 7879h \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中：

L ——是可量化的寿命度量（平均寿命、特征寿命、中位寿命、BX 寿命等）；

本例的加速系数（AF）可通过将加速应力水平（ V_A ）、正常使用应力水平（ V_U ）和 n 放入相应公式中获得。

$$AF = \left(\frac{V_A}{V_U} \right)^n = \left(\frac{1200}{630} \right)^{1.2453} = 2.23 \quad \dots\dots\dots(5)$$

正常使用条件下的平均失效时间为：

$$MTTF = \frac{1}{0.000000041452 \times 630^{1.2453}} \times \Gamma\left(\frac{1}{4.5} + 1\right) = 7191h \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中：

MTTF——(meantime to failure)失效前的平均失效时间;

置信水平为 0.95 的 MTTF 的置信区间为 (6019,8592) h。 B_{10} 正常使用条件下的寿命为:

$$F(B_{10}) = 1 - R(t, V) = 1 - e^{-(K \cdot V^n \cdot t)^\beta} = 1 - e^{-(0.000000041452 \times 630^{1.2453} \cdot t)^\beta} \dots\dots\dots(7)$$

$$0.1 = 1 - e^{-(0.000000041452 \times 630^{1.2453} \cdot t)^\beta} \dots\dots\dots(8)$$

B_{10} 寿命: 4782h

置信水平为 0.95 的 B_{10} 的置信区间为(3847, 5943)h。

附录 B
(资料性)
逆幂律模型简介

B.1 逆幂律寿命应力模型简介

逆幂律 (IPL) 模型通常用于非热加速应力, 由下式给出:

$$L(V) = \frac{1}{KV^n} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

L ——可量化的寿命度量 (平均寿命、特征寿命、中位寿命、 B_x 寿命等)

V ——应力水平

K 、 n ——模型参数 ($k>0, n>0$)

当在双对数坐标系上绘制时, 逆幂律显示为一条直线。直线方程如下:

$$\ln(L) = -\ln(K) - n \ln(V) \dots\dots\dots(2)$$

参数 n 在逆幂模型中, 是应力对寿命影响的度量, 即 n 值越大, 应力的影响越大。接近 0 的 n 值表示应力对寿命的影响很小, 当 $n=0$ 时没有影响 (恒定应力寿命)。

对于逆幂律模型, 加速因子由下式给出:

$$AF = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{\frac{1}{KV_U^n}}{\frac{1}{KV_A^n}} = \left(\frac{V_A}{V_U} \right)^n \dots\dots\dots(3)$$

式中:

L_{USE} ——正常使用寿命;

$L_{Accelerated}$ ——加速使用寿命;

逆幂律威布尔模型可以通过设置 $n=L(V)$, 在应力水平 V 下产生如下 IPL-Weibull 概率密度函数:

$$f(t;V) = \beta \cdot K \cdot V^n (K \cdot V^n \cdot t)^{\beta-1} e^{-(K \cdot V^n \cdot t)^\beta} \dots\dots\dots(4)$$

IPL-Weibull 模型的平均失效时间 (MTTF) 由下式给出:

$$MTTF = \frac{1}{KV^n} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \dots\dots\dots(5)$$

应力水平 V 下的 IPL-Weibull 可靠性函数如下所示:

$$R(t;V) = e^{-(K \cdot V^n \cdot t)^\beta} \dots\dots\dots(6)$$

