(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108564282 B
(45)授权公告日 2021.08.27

(21)申请号 201810332446.2

(22)申请日 2018.04.13

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108564282 A

(43)申请公布日 2018.09.21

(73)专利权人 东北大学
地址 110169 辽宁省沈阳市浑南区创新路195号

(72)发明人 谢里阳　吴宁祥　李海洋

(74)专利代理机构 沈阳优普达知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 21234
代理人 李晓光

(51)Int.Cl.
G06Q 10/06(2012.01)

(56)对比文件
CN 103065052 A,2013.04.24
CN 102081767 A,2011.06.01
CN 105224766 A,2016.01.06
US 2013197875 A1,2013.08.01
US 9818136 B1,2017.11.14
李慧亮 等.基于威布尔分布的数控机床可靠性分析.《机床与液压》.2014,第191-194页.

审查员 黄骏雄

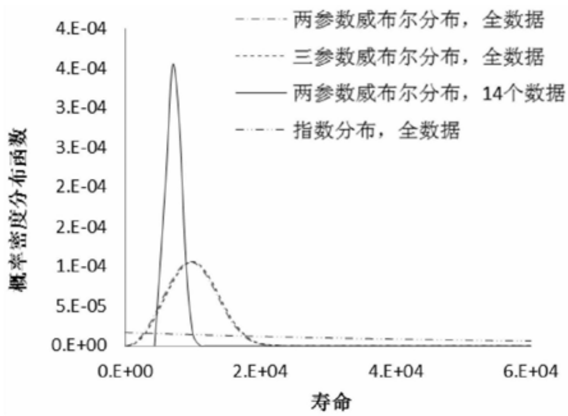
权利要求书2页　说明书7页　附图1页

(54)发明名称

一种用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法

(57)摘要

本发明涉及一种用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法,包括以下步骤:确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中形状参数β;确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中位置参数γ;确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中尺度参数η;通过形状参数β、位置参数γ以及尺度参数η写出产品寿命分布具体表达形式,进而计算得到机电产品寿命均值、标准差和变异系数的值;根据机电产品寿命均值、标准差和变异系数的值,对截尾试验数据进行取舍。本发明基于抽样思想,提出在形状参数已知的情形下,对轴承进行可靠性评估的新方法,采用三参数威布尔分布进行拟合及参数估计,得到更高的精度,更能反映产品可靠性的实际情况。



CN 108564282 B

1.一种用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法,其特征在于包括以下步骤:

1)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中形状参数β;

2)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中位置参数γ;

步骤2)中确定机电产品寿命Weibull分布位置参数γ估计为:

若共有n个寿命观测样本,将寿命观测值由小到大排列,其中第i个样本的寿命为ti,应用非参数方法估计其寿命大于ti的概率;

若观测值中有部分寿命数据ti,取i＝1,2,…,r和部分截尾数据ti+,取i＝r+1,r+2,…,n则通过修正秩来近似估计寿命大于各ti值的概率;

若只有n个截尾寿命数据ti+,取i＝1,2,…,n则估计出寿命大于t1+的概率:

估计失效概率,即性能指标小于ti的概率的中位秩公式为:

$$\hat{F}(t_i)=\frac{i}{i+(n+1-i)F_{2(n+1-i),2i,(1-\alpha)}} \qquad i=0,1,2,\ldots,n \tag{1}$$

式中,i为n个样本中寿命为ti的第i个样本的秩,$F_{2(n+1-i),2i,(1-\alpha)}$为自由度为2(n+1-i)和2i的F分布的中位数,α为显著水平;

3)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中尺度参数η;

4)通过形状参数β、位置参数γ以及尺度参数η写出产品寿命分布具体表达形式,进而计算得到机电产品寿命均值、标准差和变异系数的值;

5)根据机电产品寿命均值、标准差和变异系数的值,对截尾试验数据进行取舍。

2.根据权利要求1所述的用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法,其特征在于:步骤4)中,机电产品寿命分布具体表达形式为:

机电产品的寿命t用威布尔分布描述,三参数威布尔分布的概率密度函数和可靠性函数分别为:

$$f(t)=\begin{cases}\dfrac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^{\beta}}\exp[-(\dfrac{t-\gamma}{\eta})^{\beta}] & t\geq\gamma\\ 0 & t<\gamma\end{cases}$$

$$R(t)=e^{-[(t-\gamma)/\eta]^{\beta}},\quad t\geq\gamma$$

式中,β为形状参数,β>0;η为尺度参数,η>0;γ为位置参数,γ≥0;t为样本的寿命。

3.根据权利要求1所述的用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法,其特征在于步骤2)中公式(1)在工程应用时,表达为:

$$\hat{F}(t_i)\approx\frac{i-0.3}{n+0.4} \tag{2}$$

若通过试验获得了n个观测时间分别为ti的右截尾试验数据,寿命分布的位置参数γ大于ti的概率下限值的中位秩估计为:

$$\hat{F}(t_i)\approx\frac{(n-i+1)-0.3}{n+0.4} \tag{3}$$

。

4.根据权利要求1所述的用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法,其特征在于步骤3)Weibull分布尺度参数η估计为:

对于成功/失效型统计分析问题，用二项分布表达可靠度、置信度、样本量与失效数之间的关系：

$$\sum_{j=0}^{r}\binom{n}{j}R^{n-j}(1-R)^{j}=1-C \tag{6}$$

式中，n为截尾样本数量，r为失效样本数，R为可靠度，C为置信度，j为截尾样本序号；

对于r＝0的特殊情形，有：

$$R^{n}=1-C \tag{7}$$

。

5.根据权利要求4所述的用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法，其特征在于对于多重截尾、无失效数据条件下的寿命估计问题，有：

$$\prod_{i=1}^{n}R_i=1-C \tag{8}$$

式中，n为截尾样本数量，Ri为寿命大于ti的概率，ti为从小到大排列的第i个样本的截尾时间。

6.根据权利要求4所述的用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法，其特征在于对于寿命服从Weibull分布的情况，有：

$$\prod_{i=1}^{n}e^{-[(t_i-\gamma)/\eta]^{\beta}}=1-C \tag{9}$$

给定置信度的Weibull分布尺度参数η估计式：

$$\eta=\left[\frac{\sum(t_i-\gamma)^{\beta}}{-\ln(1-C)}\right]^{1/\beta} \tag{10}$$

其中e为自然常数，γ为位置参数，η为尺度参数，β为机电产品寿命Weibull分布形状参数，C为置信度，ti为第i个样本的寿命。

7.根据权利要求1所述的用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法，其特征在于步骤4)根据产品寿命均值和标准差和变异系数的值，结合实例对截尾试验数据的进行选择，在无失效数据样本为15～25组时：

1)舍弃较短的前3～5组截尾时间对应的无失效数据样本，保留其他样本；

2)保留较长的后6～8组截尾时间对应的无失效数据样本，舍弃其他样本。

一种用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法

技术领域

[0001]　本发明涉及一种产品的可靠性评估技术，具体为一种用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法。

背景技术

[0002]　近年来，基于无失效数据的产品可靠性评估问题受到越来越多的关注，相关内容包括无失效可靠性抽样检验、无失效数据寿命分布参数估计、无失效数据最优置信限分析、修正似然函数和退化型失效模型的统计分析等。Martz和Waller最早提出指数分布条件下无失效数据可靠性控制检验方法，按照后验分布风险准则选取失效概率先验分布，进而得出对失效概率的估计。赵海兵等[3]扩展了失效率概估计方法，提出了失效率概的分布类型在威布尔分布与正态分布时的最小二乘估计和Bayes估计方法，并验证了方法的有效性和稳健性。

[0003]　配分布曲线法一般不需要预先获取可靠度范围，相关参数可通过点估计获得。该方法对轴承寿命试验无失效数据进行相关分布参数的点估计，能够得到可靠度的点估计值。还可以利用E-Bayes估计和参数区间估计计算产品的可靠度，得到可靠度的点估计和区间估计。置信限法可直接利用无失效时间数据估计产品的可靠度，计算过程简单，效率高。关于置信限法在无失效数据产品的可靠性研究中的应用，Kayis等将与产品可靠性有关的参数作为随机变量，利用不同置信区间的参数估计得到单侧置信限下的可靠度。

[0004]　根据寿命数据(失效数据)，尤其是大样本数据评估产品的可靠性，已有比较成熟的方法。但对于长寿命、高可靠性产品，要想获得其失效数据，要花费相当长的试验时间。另一方面，载荷强化试验涉及到寿命及其分散性等效等复杂问题，很难满足一些具体工程问题的需求。对于尚处于开发阶段的产品，可用样品数量及允许的试验时间都十分有限。对于造价昂贵的材料和复杂的产品，如飞机、船舶、武器装备等，进行大样本量的试验通常也是不现实的。对于这些种类的产品，可靠性评估通常只能依赖数量有限的非失效数据。所以，发展在无失效数据情况下的可靠性评估理论的意义与价值都非常显著。

[0005]　Weibull分布在机电产品寿命及可靠性评估方面已经非常成熟，但是主要是对两参数威布尔分布。对于长寿命产品而言，两参数Weibull分布明显低估了产品的寿命与可靠性。

发明内容

[0006]　本发明针对使用现有方法对产品的可靠性评估低估了产品的寿命与可靠性等不足，本发明要解决的技术问题是提供一种更能真实反映产品可靠性的用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法。

[0007]　为解决上述技术问题，本发明采用的技术方案是：

[0008]　本发明一种用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法，包括以下步骤：

[0009]　1)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中形状参数β；

[0010] 2)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中位置参数γ；

[0011] 3)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中尺度参数η;

[0012] 4)通过形状参数β、位置参数γ以及尺度参数η写出产品寿命分布具体表达形式，进而计算得到机电产品寿命均值、标准差和变异系数的值;

[0013] 5)根据机电产品寿命均值、标准差和变异系数的值，对截尾试验数据进行取舍。

[0014] 步骤4)中，机电产品寿命分布具体表达形式为：

[0015] 机电产品的寿命t用威布尔分布描述，三参数威布尔分布的概率密度函数和可靠性函数分别为：

[0016] $$f(t)=\begin{cases}\dfrac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^{\beta}}\exp[-(\dfrac{t-\gamma}{\eta})^{\beta}] & t\geq\gamma\\ 0 & t<\gamma\end{cases}$$

[0017] $$R(t)=e^{-[(t-\gamma)/\eta]^{\beta}},\quad t\geq\gamma$$

[0018] 式中，β为形状参数，β>0；η为尺度参数，η>0；γ为位置参数，γ≥0；t为样本的寿命。

[0019] 步骤2)中确定机电产品寿命Weibull分布位置参数γ估计为：

[0020] 若共有n个寿命观测样本，将寿命观测值由小到大排列，其中第i个样本的寿命为t_i，应用非参数方法估计其寿命大于t_i的概率；

[0021] 若观测值中有部分寿命数据t_i(i＝1,2,…,r)和部分截尾数据t_i^+(i＝r+1,r+2,…,n)，则通过修正秩来近似估计寿命大于各t_i值的概率；

[0022] 若只有n个截尾寿命数据t_i^+(i＝1,2,…,n)，则估计出寿命大于t_1^+的概率：

[0023] 估计失效概率(性能指标小于t_i的概率)的中位秩公式为：

[0024] $$\hat{F}(t_i)=\frac{i}{i+(n+1-i)F_{2(n+1-i),2i,(1-\alpha)}}\qquad i=0,1,2,\ldots,n \tag{1}$$

[0025] 式中，i为n个样本中寿命为t_i的第i个样本的秩，$F_{2(n+1-i),2i,(1-\alpha)}$为自由度为2(n+1-i)和2i的F分布的中位数，α为显著水平。

[0026] 步骤2)中公式(1)在工程应用时，表达为：

[0027] $$\hat{F}(t_i)\approx\frac{i-0.3}{n+0.4} \tag{2}$$

[0028] 若通过试验获得了n个观测时间分别为t_i的右截尾试验数据，寿命分布的位置参数γ大于t_i的概率下限值的中位秩估计为：

[0029] $$\hat{F}(t_i)\approx\frac{(n-i+1)-0.3}{n+0.4} \tag{3}$$

[0030] 步骤3)Weibull分布尺度参数η估计为：

[0031] 对于成功/失效型统计分析问题，用二项分布表达可靠度、置信度、样本量与失效数之间的关系：

[0032] $$\sum_{j=0}^{r}\binom{n}{j}R^{n-j}(1-R)^{j}=1-C \tag{6}$$

[0033] 式中，n为截尾样本数量，r为失效样本数，R为可靠度，C为置信度，j为截尾样本序

号；

[0034] 对于r＝0的特殊情形，有：

[0035] $R^n=1-C$ (7)

[0036] 对于多重截尾、无失效数据条件下的寿命估计问题，有：

[0037] $$\prod_{i=1}^{n} R_i = 1 - C \qquad (8)$$

[0038] 式中，n为截尾样本数量，R_i为寿命大于t_i的概率，t_i为从小到大排列的第i个样本的截尾时间。

[0039] 对于寿命服从Weibull分布的情况，有：

[0040] $$\prod_{i=1}^{n} e^{-[(t_i-\gamma)/\eta]^{\beta}} = 1 - C \qquad (9)$$

[0041] 给定置信度的Weibull分布尺度参数η估计式：

[0042] $$\eta = [\frac{\sum (t_i-\gamma)^{\beta}}{-\ln(1-C)}]^{1/\beta} \qquad (10)$$

[0043] 其中e为自然常数，γ为位置参数，n为尺度参数，β为机电产品寿命Weibull分布形状参数，C为置信度，ti为第i个样本的寿命。

[0044] 步骤4)根据产品寿命均值和标准差和变异系数的值，结合实例对截尾试验数据的进行选择，在无失效数据样本为15～25组时：

[0045] 1)舍弃较短的前3～5组截尾时间对应的无失效数据样本，保留其他样本；

[0046] 2)保留较长的后6～8组截尾时间对应的无失效数据样本，舍弃其他样本。

[0047] 本发明具有以下有益效果及优点：

[0048] 1.本发明方法基于抽样思想，提出了在形状参数已知的情形下，对轴承进行可靠性评估的新方法，采用三参数威布尔分布进行拟合及参数估计，可以得到更高的精度，因而较两参数威布尔分布，更能反映产品可靠性的实际情况。

[0049] 2.本发明通过样本取舍原则选取更少的样本得到产品寿命分布函数的估计同样满足产品可靠性分析需求，利用较长的截尾时间对应的无失效数据样本的得到产品寿命的分布函数的尺度参数更小，说明寿命离散度小。

附图说明

[0050] 图1为两参数/三参数Weibull及指数分布估计的概率密度函数图；

[0051] 图2为不同样本量估计的寿命分布曲线图。

具体实施方式

[0052] 下面结合说明书附图对本发明作进一步阐述。

[0053] 如图1所示，本发明一种用于可靠性评估的截尾寿命数据取舍方法，其特征在于包括以下步骤：

[0054] 1)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中形状参数β；

[0055] 2)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中位置参数γ；

[0056] 3)确定用于表征机电产品寿命的Weibull分布函数中尺度参数η；

[0057] 4)通过形状参数β、位置参数γ以及尺度参数η写出产品寿命分布具体表达形式，进而计算得到机电产品寿命均值、标准差和变异系数的值；

[0058] 5)根据产品寿命均值、标准差和变异系数的值，对截尾试验数据进行取舍。

[0059] 本发明利用可靠性定时截尾试验数据进行产品的可靠性评估，在无失效数据条件下将产品寿命的估计从两参数威布尔分布扩展到三参数威布尔分布，并提出截尾试验数据的取舍原则。

[0060] 大量数据表明，机电产品的寿命t可用威布尔分布描述。三参数威布尔分布的概率密度函数和可靠性函数分别为：

[0061] $$f(t)=\begin{cases}\dfrac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^{\beta}}\exp[-(\dfrac{t-\gamma}{\eta})^{\beta}] & t\geq\gamma\\ 0 & t<\gamma\end{cases}$$

[0062] $$R(t)=e^{-[(t-\gamma)/\eta]^{\beta}},\quad t\geq\gamma$$

[0063] 式中，β为形状参数(β>0)；η为尺度参数(η>0)；γ为位置参数(γ≥0)。在对伺服电机产品进行可靠性评估时，以上三个参数均为未知参数，需要进行参数估计或者等效假设。

[0064] 步骤1)中，确定电机寿命Weibull分布形状参数β，同类产品在类似服役环境条件、相同失效机理和失效模式下，其寿命Weibull分布的形状参数β基本相同。产品寿命分布的这一特征为其寿命分布拟合及可靠性评估提供了许多方便。本实施例假设伺服电机寿命分布的形状参数β值为3.0。

[0065] 步骤2)确定电机寿命Weibull分布位置参数估计，是应用三参数Weibull分布的前提。若共有n个寿命观测样本，将寿命观测值由小到大排列，其中第i个样本的寿命为t_i，则可应用非参数方法估计其寿命大于t_i的概率。若观测值中有部分寿命数据t_i(i＝1,2,…,r)和部分截尾数据t_i^+(i＝r+1,r+2,…,n)，可以通过修正秩来近似估计寿命大于各t_i值的概率。若只有n个截尾寿命数据t_i^+(i＝1,2,…,n)，也可估计出寿命大于t_1^+的概率。

[0066] 估计失效概率(性能指标小于t_i的概率)的中位秩公式为：

[0067] $$\hat{F}(t_i)=\frac{i}{i+(n+1-i)F_{2(n+1-i),2i,(1-\alpha)}}\qquad i=0,1,2,\ldots,n\tag{1}$$

[0068] 式中，i为n个样本中寿命为t_i的第i个样本的秩(序数)，$F_{2(n+1-i),2i,(1-\alpha)}$为自由度为2(n+1-i)和2i的F分布的中位数，α为显著水平。

[0069] 在工程应用中，上式可近似表达为

[0070] $$\hat{F}(t_i)\approx\frac{i-0.3}{n+0.4}\tag{2}$$

[0071] 再由寿命截尾试验样本数据估计Weibull分布的位置参数γ。

[0072] Weibull分布的位置参数γ的意义是寿命的最小值。也就是说，从统计的角度全部样本值都将大于该值。若通过试验获得了n个观测时间分别为t_i的右截尾试验数据，由式(2)可知寿命分布的位置参数γ大于t_i的概率下限值的中位秩估计为：

[0073] $$\hat{F}(t_i) \approx \frac{(n-i+1)-0.3}{n+0.4} \qquad (3)$$

[0074] 显然，位置参数γ的估计结果与n、i和t_i有关。

[0075] 本实施例以伺服电机为例，应用全部52个右截尾观测数据，可得出位置参数γ大于t_1(256h)的概率为0.987。然而，这未必是最理想(过于保守)的估计结果，而是由观测值t_1决定的一个原理上正确的结果。舍弃t_1(从统计学原理看是完全合理的)，得到的结果是位置参数γ大于720h(t_2)的概率为0.986。由于位置参数γ的大小会明显影响最终的寿命分布拟合及可靠性评估结果，为避免位置参数γ的估计结果过于保守，以95％的概率估计位置参数γ值比较合理(与对产品可靠性估计要求的95％置信度一致)。

[0076] 因此，根据95％的概率要求，样本量可由以下方程解出：

[0077] $$0.95 \approx \frac{n_{95}-0.3}{n_{95}+0.4} \qquad (4)$$

[0078] 即，$n_{95} \approx 13.6$

[0079] 同理，要使估计达到97.5％的概率所需要的样本量可由下式计算

[0080] $$0.975 \approx \frac{n_{97.5}-0.3}{n_{97.5}+0.4} \qquad (5)$$

[0081] 即，$n_{97.5} \approx 27.6$

[0082] 因此，样本量大于此临界值时，可以以观测时间较长的后14个样本为依据进行位置参数估计，以对应的截尾时间t_{n-14+1}为Weibull分布的位置参数γ。

[0083] 步骤3)中，Weibull分布尺度参数估计，对于成功/失效型统计分析问题，可用二项分布表达可靠度、置信度、样本量与失效数之间的关系：

[0084] $$\sum_{j=0}^{r} \binom{n}{j} R^{n-j}(1-R)^j = 1-C \qquad (6)$$

[0085] 式中，式中，n为截尾样本数量，r为失效样本数，R为可靠度，C为置信度，j为序号。

[0086] 对于$r=0$的特殊情形，有：

[0087] $R^n = 1-C$ (7)

[0088] 对于多重截尾、无失效数据条件下的寿命估计问题，有：

[0089] $$\prod_{i=1}^{n} R_i = 1-C \qquad (8)$$

[0090] 式中，n为截尾样本数量，R_i为寿命大于t_i的概率，t_i为从小到大排列的第i个样本的截尾时间。

[0091] 对于寿命服从Weibull分布的情况：

[0092] $$\prod_{i=1}^{n} e^{-[(t_i-\gamma)/\eta]^{\beta}} = 1-C \qquad (9)$$

[0093] 其中e为自然常数，γ为位置参数，η为尺度参数，β为机电产品寿命Weibull分布形状参数。

[0094] 由式上式可以得到给定置信度的Weibull分布尺度参数η估计式

[0095] $$\eta=[\frac{\sum(t_i-\gamma)^\beta}{-\ln(1-C)}]^{1/\beta} \qquad (10)$$

[0096] 本实施例中，为了评估某伺服电机的可靠性，首先获取了一些产品的实际运行记录数据，即表1所示的52个样本的现场运行时间数据。在观测期间无失效发生，也就是说获得的全部都是右截尾数据。本文的目的是就此类观测数据，研究产品可靠性评估方法，包括观测数据取舍原则，并估计置信度为95％、寿命5000h的可靠度。

[0097] 表1伺服电机运行寿命数据

[0098]

运行时间/h	产品台数	运行时间/h	产品台数
256	2	2960	2
720	2	3600	2
960	2	4240	4
1200	2	4320	10
1360	2	4960	2
1440	6	5440	3
2400	2	5520	1
2560	2	5760	2
2640	2	7200	4

[0099] 首先，应用全部样本，即n＝52，最小寿命为256h，相当于以98.7％的概率估计位置参数γ获得的结果。假设寿命所服从的Weibull分布的形状参数β等于3，由式(10)估计得到尺度参数η为11047.4h。

[0100] 可计算出服役5000小时的可靠度为：

[0101] $$R(5000)=e^{-(5000/11047.4)^3}=0.911$$

[0102] 由以下公式

[0103] $$E(x)=\gamma+\eta\ \Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$$

[0104] $$V(x)=\eta^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right]$$

[0105] 可计算出寿命均值和标准差分别为10121.1和3585.6，变异系数为0.35。

[0106] 应用观测寿命较长的14个样本(n_{95}＝14)，以95％的概率估计出位置参数γ＝4320h。同样假设寿命所服从的Weibull分布的形状参数β等于3，由式(10)估计得到尺度参数η为3276.7h。

[0107] 由此可计算出服役5000小时的可靠度为：

[0108] $$R(5000)=e^{-[(5000-4320)/3276.7]^3}=0.991$$

[0109] 同样可计算出寿命均值和标准差分别为7246.1和1063.5，变异系数为0.15。

[0110] 寿命均值和标准差的差别如图1所示。显然，三参数Weibull分布的估计结果优于两参数Weibull分布的估计结果。

[0111]　应用观测寿命较长的30个样本($n_{97.7}=30$)，对应的最小寿命值为2960h。仍假设寿命所服从的三参数Weibull分布的形状参数β等于3，由式(10)估计得到尺度参数η为5314.5h。

[0112]　可计算出服役5000小时的可靠度为：

[0113]　$R(5000)=e^{-[(5000-2960)/5314.5]^3}=0.945$

[0114]　寿命均值和标准差分别为8705.8和1724.8，变异系数为0.20。

[0115]　应用观测寿命较长的30个样本，采用两参数Weibull分布(即令最小寿命为0)，假设寿命所服从的Weibull分布的形状参数β等于3，由式(10)估计得到尺度参数η为10933.8h。

[0116]　可计算出服役5000小时的可靠度为：

[0117]　$R(5000)=e^{-[5000/10933.8]^3}=0.909$

[0118]　其均值和标准差分别为9763.7和3548.6，变异系数为0.36。

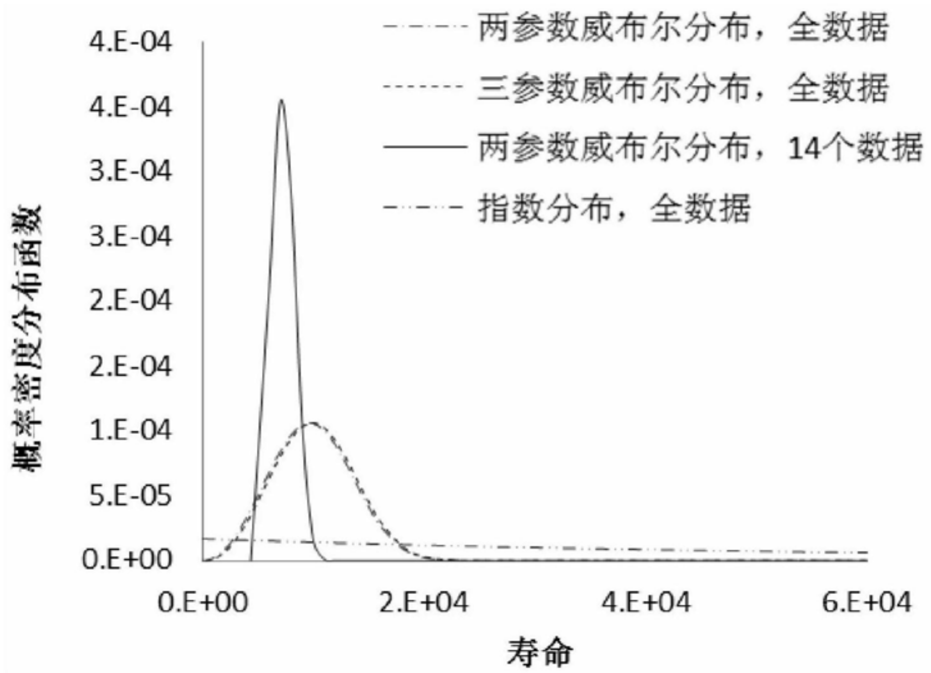
[0119]　应用观测寿命较长的30个样本，假设寿命所服从指数分布，估计得到平均寿命为48522.4h。

[0120]　可计算出服役5000小时的可靠度为：

[0121]　$R(5000)=e^{-5000/48522.4}=0.902$

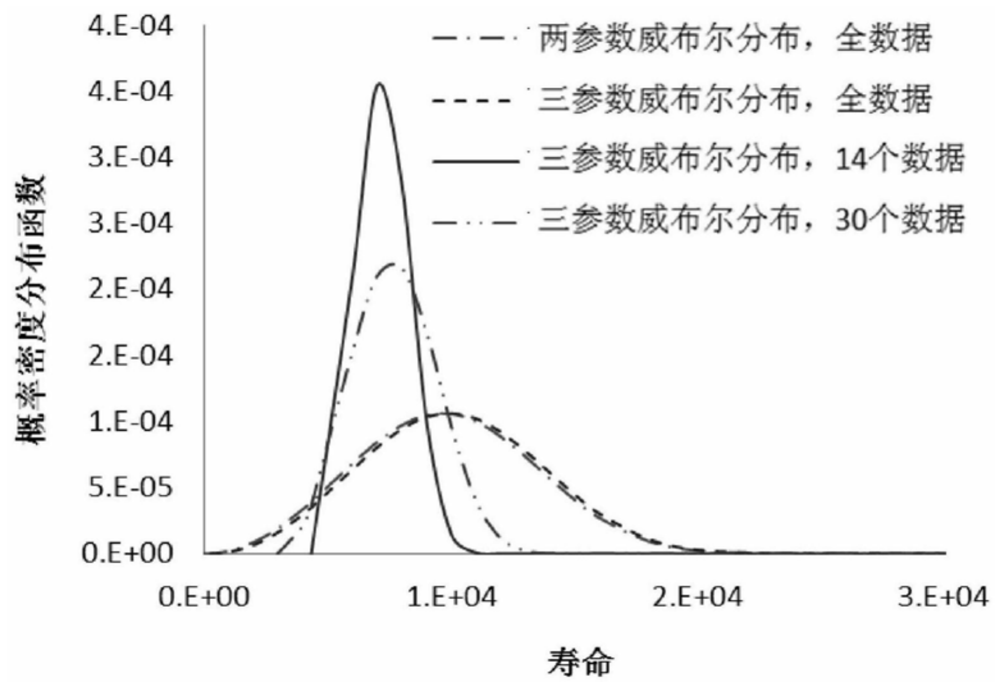
[0122]　不同样本量估计的寿命分布曲线如图2所示。

[0123]　本发明方法基于抽样思想，提出了在形状参数已知的情形下，对伺服电机进行可靠性评估的新方法。相关的处理结果显示，该方法的处理结果受试验时间的影响较大，同时也受伺服电机试验数量的影响，采用该方法处理无失效数据时，试验时间应尽量取得长些，参与试验的样品数量也应该相应多些，才能使估计更符合真实情况。采用三参数威布尔分布进行拟合及参数估计，可以得到更高的精度，因而较两参数威布尔分布，更能反映产品可靠性的实际情况。



两参数威布尔分布，全数据
三参数威布尔分布，全数据
两参数威布尔分布，14个数据
指数分布，全数据
4.E-04
4.E-04
3.E-04
3.E-04
2.E-04
2.E-04
1.E-04
5.E-05
0.E+00
0.E+00
2.E+04
4.E+04
6.E+04
概率密度分布函数
寿命

图1



两参数威布尔分布，全数据
三参数威布尔分布，全数据
三参数威布尔分布，14个数据
三参数威布尔分布，30个数据
4.E-04
4.E-04
3.E-04
3.E-04
2.E-04
2.E-04
1.E-04
5.E-05
0.E+00
0.E+00
1.E+04
2.E+04
3.E+04
概率密度分布函数
寿命

图2