

船体可靠性评估

郭金龙^{1,3}, 沈继红^{1,2}, 张 浩¹

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 齐齐哈尔大学 理学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要:为了研究不同结构船体的寿命和使用时可靠度的关系,提出了一种基于试验的可靠度估计方法。针对不同结构船体寿命服从 Weibull 分布,在无失效数据情形下、置信度至少为 γ 和寿命为 t 时,根据船体寿命试验数据,给出了可靠度的单侧置信下限。该方法是在 Weibull 分布形状参数下限已知的情况下,能将所有的无失效寿命数据进行累加,大大提高了可靠性分析的精度。最后,对钢结构、钛合金结构、铝合金结构的船体,在寿命为 t 月、置信度至少为 γ 时,计算了 3 种结构船体的可靠度单侧置信下限。结果表明该方法易于计算,便于工程应用。

关键词:船体寿命; 可靠性评估; 无失效数据; Weibull 分布

中图分类号: TP202.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2009)12-0064-04

由于大型船舶建造周期长、成本高,不可能单独进行长时间的寿命试验去获得完全可靠的试验数据,而且在船体寿命可靠性试验中,常会得到各种截尾数据。在定时截尾可靠性试验中,有时会遇到无失效数据,因为船体的可靠性高、样本少,更易产生无失效数据,所以对船体无失效数据的研究,是在船体寿命可靠性分析中迫切需要解决的问题。自文献[1]发表以来,对无失效数据问题的研究已有 20 多年的历史,并取得了一些成果。关于无失效数据问题的研究进展情况见文献[2]。而文献[3~6]都是对船舶在无失效数据的情形下进行的分析和研究。该文对船体寿命无失效试验数据服从两参数 Weibull 分布时,而其中的形状参数 α 的下限 α_0 可以通过大量的统计资料来确定^[7~10]。因此,该文就是在 α_0 已知的情况下,利用船体寿命无失效试验数据对不同结构船体的可靠性进行了评估。

1 指数分布无失效数据可靠性分析

对某型船舶分别进行 m 次定时截尾试验,截尾时间为 t_i (单位为月) ($t_1 < t_2 < \dots < t_m$) 相应试验船舶数为 n_i ,若试验的结果是所有船舶无一失效,则称 (n_i, t_i) ($i=1, 2, \dots, m$) 为无失效数据。

设 (n_i, t_i) , $i=1, 2, \dots, m$ 是来自指数分布

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)\right] \quad (1)$$

的一组无失效数据,那么在给定的寿命 t 和置信度为 γ 时,可靠度 R 的单侧置信下限为

$$R_L = \exp\left[\frac{t \ln(1 - \gamma)}{\sum_{i=1}^m n_i t_i}\right] \quad (2)$$

2 船体可靠性评估

文献[7,8]分别是对轴承和卫星推力器在无失效数据情形下的可靠性评估和寿命预测的,而文献[12]是在无失效数据情形下对可靠性参数的估计和调整,文献[13]是对可靠性参数的置信限进行了估计。该文在上述的基础上并对方法进行改进而得到了船体可靠性评估^[11]方法。

设 (n_i, t_i) , $i=1, 2, \dots, m$ 是来自 Weibull 分布

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

的一组无失效数据,其中 α 为形状参数, β 为尺度参

收稿日期:2008-10-13;修回日期:2009-09-23

作者简介:郭金龙(1976-),男,黑龙江勃利人,博士研究生,齐齐哈尔大学理学院讲师,E-mail: gjlhd8866@163.com

数。根据式(2)可以推知,对于给定的寿命 t 时,两参数 Weibull 分布可靠度 R 的置信度为 γ 的单侧置信下限为

$$R_L = \exp \left[\frac{t^a \ln(1-\gamma)}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^a} \right] \quad (4)$$

但是,工程实际中形状参数 α 是未知的,因此,还不能直接采用式(4)对无失效数据进行可靠性分析。由于在许多情况下能够知道 $\alpha \geq \alpha_0$,其中 α_0 是一已知常数。所以可以证明,当给定的寿命 t 满足

$$t \leq \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0} \ln t_i}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0}} \right) \quad (5)$$

时,其可靠度 R 的置信度至少为 γ 的单侧置信下限为

$$R_L^* = \exp \left[\frac{t^{\alpha_0} \ln(1-\gamma)}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0}} \right] \quad (6)$$

即

$$P(R \geq R_L^*) \geq \gamma \quad (7)$$

证明:对式(4)取导数,得

$$\frac{\partial R_L}{\partial \alpha} = \left[\frac{t^a \ln(1-\gamma)}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^a} \right] \exp \left[\frac{t^a \ln(1-\gamma)}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^a} \right] \times \left(\ln t - \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_i^a \ln t_i}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^a} \right)$$

所以,当

$$\ln t \leq \frac{\sum_{i=1}^m n_i t_i^a \ln t_i}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^a} \quad (8)$$

时, R_L 为 α 的单调增函数。

因此,当 $\alpha_0 \leq \alpha$ 时有

$$R_L^* = \exp \left[\frac{t^{\alpha_0} \ln(1-\gamma)}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0}} \right] \leq \exp \left[\frac{t^a \ln(1-\gamma)}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^a} \right] = R_L$$

从而

$$P(R \geq R_L^*) \geq P(R \geq R_L) = \gamma$$

即当式(5)成立时,式(6)给出的就是可靠度 R 的置

信度至少为 γ 的单侧置信下限。

3 试验仿真

对集装箱 5600 船舶(标箱)分别进行 m 次定时截尾试验(或跟踪调查的方法),得到其使用寿命的截尾数据,截尾时间为 t_i (单位为月) ($t_1 < t_2 < \dots < t_m$) 相应试验船舶数为 n_i (或跟踪调查的船舶数),若试验的(或跟踪的)结果是所有船体无一失效,则称 (n_i, t_i) ($i=1, 2, \dots, m$) 为集装箱 5600 船体寿命无失效数据(本数据是中国船级社对集装箱 5600 船跟踪调查得到的)。见表 1。

表 1 5600 船体寿命无失效数据

Tab. 1 Zero-failure data of hulls life of 5600-ship

i	n_i	t_i
1	1	36
2	1	60
3	1	84
4	2	120
5	1	132
6	2	144
7	2	168
8	1	180
9	1	204
10	2	240
11	1	276

根据大量的统计资料和美国波音公司通过对大量 Weibull 分布试验数据的统计分析^[7~10],给出了以下结果:对于钢结构 $\alpha_0 = 2.2$;对于钛合金结构 $\alpha_0 = 3$;对于铝合金结构 $\alpha_0 = 4$ 。

3.1 钢结构船体的可靠性评估

因为 Weibull 分布的形状参数 α 的下限 α_0 对于钢结构的 $\alpha_0 = 2.2$

根据式(5)可知,当给定的寿命 t 满足

$$t \leq \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0} \ln t_i}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0}} \right) = 196.7349$$

时,由式(6)求得钢结构船体对应于寿命 t 月、置信度

γ 至少为 0.95 和 0.90 的可靠度 R_L^* 置信下限, 计算结果见表 2。

表 2 钢结构船体的可靠性评估

Tab. 2 Reliability estimation of steel structure hulls

t	γ	R_L^*
72	0.95	0.970 3
96	0.95	0.944 7
120	0.95	0.911 3
144	0.95	0.870 5
168	0.95	0.823 0
192	0.95	0.770 1
196, 734 9	0.95	0.759 1
72	0.90	0.977 1
96	0.90	0.957 2
120	0.90	0.931 1
144	0.90	0.898 9
168	0.90	0.861 0
192	0.90	0.818 1
196, 734 9	0.90	0.809 1

3.2 钛合金结构船体的可靠性评估

因为 Weibull 分布的形状参数 α 的下限 α_0 对于钛合金结构的 $\alpha_0 = 3$, 根据式(5)可知, 当给定的寿命 t 满足

$$t \leq \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0} \ln t_i}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0}} \right) = 210.062\ 8$$

时, 由式(6)求得钛合金结构船体对应于寿命 t 月、置信度 γ 至少为 0.95 和 0.90 的可靠度 R_L^* 置信下限, 计算结果见表 3。

表 3 钛合金结构船体的可靠性评估

Tab. 3 Reliability estimation of titanium alloy structure hulls

t	γ	R_L^*
72	0.95	0.986 9
96	0.95	0.969 3
120	0.95	0.941 0
144	0.95	0.900 2
168	0.95	0.846 2
192	0.95	0.779 4
210, 062 8	0.95	0.721 5
72	0.90	0.989 9
96	0.90	0.976 3
120	0.90	0.954 3
144	0.90	0.922 4
168	0.90	0.879 5
192	0.90	0.825 6
210, 062 8	0.90	0.778 1

3.3 铝合金结构船体的可靠性评估

因为 Weibull 分布的形状参数 α 的下限 α_0 对于铝合金结构的 $\alpha_0 = 4$, 根据式(5)可知, 当给定的寿命 t 满足

$$t \leq \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0} \ln t_i}{\sum_{i=1}^m n_i t_i^{\alpha_0}} \right) = 223.405\ 4$$

时, 由式(6)求得铝合金结构船体对应于寿命 t 月、置信度 γ 至少为 0.95 和 0.90 的可靠度 R_L^* 置信下限, 计算结果见表 4。

表 4 铝合金结构船体的可靠性评估

Tab. 4 Reliability estimation of aluminium alloy structure hulls

t	γ	R_L^*
72	0.95	0.995 6
96	0.95	0.986 3
120	0.95	0.966 9
144	0.95	0.932 6
168	0.95	0.878 7
192	0.95	0.802 1
216	0.95	0.702 3
223, 405 4	0.95	0.667 4
72	0.90	0.996 7
96	0.90	0.989 5
120	0.90	0.974 5
144	0.90	0.947 8
168	0.90	0.905 4
192	0.90	0.844 0
216	0.90	0.762 2
223, 405 4	0.90	0.732 9

4 结论

(1) 该方法是在给定船体使用寿命和置信度且给定的船体使用寿命满足一定条件时而得到船体的可靠度置信下限, 即在船体使用寿命为 t 和置信度为 γ 时船体使用的最小可靠度是 R_L^* 。反之, 在已知船体可靠度置信下限和置信度时就能得到船体的使用寿命, 并据此判断得到的使用寿命是否满足给定的条件和工程上的要求。(2) 从表 2, 3, 4 中可以看出, 相同的置信度当使用时间增大时可靠度都在递减。

这是与实际相符合的,因为当船体在使用年限增大时可靠度一定会减小。(3)从表 2,3,4 中可以看出,当置信度相同和使用寿命相同时,钢结构船体的可靠度置信下限最小而铝合金船体的可靠度置信下限最大;例如当置信度为 0.95,使用寿命都为 120 个月时钢结构船体的最小可靠度为 0.911 3 而铝合金船体最小的可靠度为 0.966 9。这说明钛合金和铝合金的强度要好于钢结构的船体。

参考文献:

- [1] Martz H F, Waller R A. A Bayes zero-failure (BAZE) reliability demonstration testing procedure [J]. *Journal of Quality Technology*, 1979, 11(3): 128-137.
- [2] 韩明. 无失效数据可靠性进展[J]. *数学进展*, 2002, 31(1): 7-19.
- [3] 王其元, 施久玉, 陈林珠. 船舶寿命无失效数据多层贝叶斯分析[J]. *哈尔滨科学技术大学学报*, 1995, 19(1): 25-28.
- [4] 陈林珠, 施久玉, 王其元. 船舶寿命试验中无失效数据的分析与处理[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 1995, 16(2): 95-99.
- [5] 郭金龙, 施久玉, 沈继红, 等. 基于无失效数据失效率的船舶寿命估计[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(6): 1 582-1 584.
- [6] 郭金龙, 施久玉, 沈继红, 等. 综合 E-Bayes 估计船舶寿命的研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2008, 29(6): 573-577.
- [7] 傅惠民, 王凭慧. 无失效数据的可靠性评估和寿命预测[J]. *机械强度*, 2004, 26(3): 260-264.
- [8] 王凭慧, 范本尧, 傅惠民. 卫星推力器可靠性评估和寿命预测[J]. *航空动力学报*, 2004, 19(6): 745-748.
- [9] 高镇同. 疲劳可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2000.
- [10] Abernethy R B. 威布尔分析手册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1992.
- [11] 陈家鼎. 生存分析与可靠性[M]. 北京:北京大学出版社, 2005.
- [12] 韩明. 无失效数据情形可靠性参数的估计和调整[J]. *应用数学学报*, 2006, 19(2): 325-330.
- [13] 韩明. 无失效数据情形可靠性参数的置信限[J]. *工程数学学报*, 2004, 21(2): 245-248.

The estimation of hull reliability

GUO Jin-long^{1,3}, SHEN Ji-hong^{1,2}, ZHANG Hao¹

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. College of Science, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Received: Oct. , 13, 2008

Key words: hull life span; reliability estimation; zero-failure data; Weibull distribution

Abstract: In order to research the relation between hull life span and using reliability, a method of the hull life span estimation based on experiments was proposed. By assuming that the hull life span satisfied the Weibull distribution, with zero-failure data, confidence limits γ and life span t , the one side lower confidence limits of reliability were given according to test data of the hull life span. If the lower limits of the parameters of the Weibull distribution were known, this method can accumulate all of zero-failure data to increase the analysis precision of reliability greatly. At last, this method computes one side lower confidence limits of reliability with the hull structures as steel, titanium alloy and aluminium alloy under the hull life span t -month and the confidence γ . The results indicate that the method is easy to compute and be applied in engineering.

(本文编辑:刘珊珊)