

竞争性故障模型可靠性评估的非参数估计方法

沈安慰, 郭基联, 王卓健
(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对航空发动机现场数据的可靠性评估面临着小子样与随机删失问题,对可靠性评估中的非参数估计方法进行了对比分析.应用蒙特卡罗方法,在竞争性故障模型下,设计了一种对比可靠性评估方法优劣性的仿真方法.该方法以三重威布尔分布为例,通过模拟产生具有随机删失特点的航空发动机现场故障数据,分别对比 4 种可靠性评估非参数估计方法的优劣性.最后通过一个工程应用案例验证了模型的有效性.仿真结果表明:在三重威布尔竞争性故障模型下,非参数估计方法的优劣顺序依次是 Kaplan-Meier 估计、平均秩次法、Herd-Johnson 估计、Nelson-Aalen 估计.

关 键 词: 竞争性故障模型; 可靠性; 非参数估计; 蒙特卡罗; 平均秩次法

中图分类号: V37 **文献标志码:** A

Nonparametric estimation method of reliability evaluation in competitive fault model

SHEN An-wei, GUO Ji-lian, WANG Zhuo-jian
(Aeronautics and Astronautics Engineering College,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The nonparametric estimation method of reliability evaluation was compared and analyzed for the problem of small sample and randomly censoring in the field data of aero-engine. Monte Carlo method was applied and a simulation method was designed to compare the reliability evaluation method within competitive fault model. Through the example of trebling Weibull distribution, random censoring observations of aero-engine were simulated through this method by comparing four nonparametric estimation methods of reliability evaluation. An example of engineering application was used to illustrate the validity of the method. Results show that the excellence order of nonparametric estimation method is Kaplan-Meier estimation, mean rank order method, Herd-Johnson estimation and Nelson-Aalen estimation under the trebling Weibull competitive fault model.

Key words: competitive fault model; reliability; nonparametric estimation; Monte Carlo; mean rank order method

可靠性是航空发动机的生命,是武器装备质量的核心,基于现场数据的评估结果是航空发动机可靠性工作的最终检验^[1].在处理航空发动机现场故障数据时,面对一组或多组数据,希望能通过这些数据所反映的重要的统计信息,并能据此作出接近真实的预测与判断,从而作出科学的决

策^[2].但在许多实际情况中,故障数据的总体分布形式往往是不知道的,或者知道总体的信息很少^[3-4].因此需要借助另一种不依赖于分布的统计方法,即所谓的非参数统计方法.随着可靠性数据处理技术的发展,愈来愈多的科技工作者与可靠性专家都意识到了非参数统计方法的重要性^[5].

目前,非参数估计方法已经在计量经济学、生物统计学和保险精算学得到了较广泛的应用,但在可靠性工程领域应用不多^[6-7].同时,基于现场数据的航空发动机可靠性评估还面临着小子样与随机删失问题.现代统计学的发展促进了非参数估计方法的多样化.目前,在分布参数未知的情况下,Kaplan-Meier估计、平均秩次法、Herd-Johnson估计、Nelson-Aalen估计、残存比率法等方法都可以适用于航空发动机的可靠性评估.但是,哪种方法更加适用于航空工程小子样与随机删失数据的可靠性评估呢?目前还鲜见相关报道.因此,如何在工程应用中选择一个适用于小子样随机删失数据下理想的非参数估计方法就显得尤为重要了^[8-9].

关于可靠性评估方法的选择问题,目前的国内外学者在参数估计领域有过较多研究^[10-11].如文献[12]对威布尔分布下常见的可靠性评估方法进行对比研究,因而受到美国统计学会的嘉奖.文献[13-14]以机群为研究对象,分别研究了平均秩次法和极大-期望值算法的适用范围,给出了较为明确的结果.文献[15]设计了一种蒙特卡罗仿真算法,对比分析了两种小子样随机删失数据下的参数估计方法的优劣性,得到了较为理想的结果.

对于非参数方法的研究,文献[16]针对涉及面广的现场数据,从其可靠性分析的困难性和必要性出发,对现场数据可靠性分析的各种非参数分析方法进行了比较.但该文献只是对这些方法进行定性分析,并没有给出具体的算例.

本文在竞争性失效模型下,设计了一种适用于对比分析非参数估计方法优劣性的仿真方法.在不同样本量、不同删失比下,以多组平均寿命的平均值和均方误差为标准来判定几种非参数估计方法的优劣,为工程实践的可靠性评估工作提供理论基础.

1 竞争性故障模型

单元级航空装备由于失效模式固定、结构组成简单等原因,往往能够找到失效分布,此时适用于参数估计的可靠性评估.而对于模型特别复杂

的航空装备或者系统、分系统级别的航空装备,其失效机理一般服从竞争性失效模型,分布参数未知.非参数估计方法就适用于分布参数未知时的可靠性评估^[17].

竞争性故障模型可以定义为,如果一个部件由 K 个微小部件组成,有 K 种失效方式.而每一种失效方式都独立地作用于这个部件,且都对应一定的失效时间,其中任何一种失效方式都会引起整个部件失效^[1].即

$$T = \min\{T_1, T_2, \dots, T_K\} \quad (1)$$

设 $F_k(t)$ 是 T_k 的累积失效分布函数,则整个部件的累积失效分布函数为

$$F(t) = 1 - \prod_{k=1}^K [1 - F_k(t)] \quad (2)$$

式中 $F_k(t)$ 可以是不同的分布,但要求这 K 个失效分布必须是独立的.如果它们之间有相互影响的关系,即一种失效会引起另一种失效,则必须考虑他们之间的相互影响.竞争性故障模型是航空发动机中比较常见的一种可靠性模型.

在指数分布下,对于任何一个失效因素起作用时,竞争性失效模型可靠度函数的通用表达式为

$$R_k(t) = 1 - F_k(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_k(x) dx\right] \quad (3)$$

式中 $\lambda_k(t)$ 是对应第 k 个失效因素的失效率,当 K 个因素同时起作用时,系统的可靠度为

$$R(t) = \prod_{k=1}^K \exp\left[-\int_0^t \lambda_k(x) dx\right] = \exp\left[-\int_0^t \sum_{k=1}^K \lambda_k(x) dx\right] \quad (4)$$

2 非参数估计方法

对于存在删失数据的可靠性数据的分析,为了估计单元级部件的可靠度,常用的非参数估计方法主要分为3类.第1类是针对随机右删失数据下的点估计,这也是可靠性估计中最常见的类型,主要方法有平均秩次法、残存比率法、Kaplan-Meier估计、Nelson-Aalen估计、Herd-Johnson估计等.第2类是针对同时存在左截尾与右删失数据时,对其可靠度函数的估计方法主要有特恩伯估计、修正乘积限估计等.第3类主要是针对只知道产品在哪个区间内发生故障或者右删失,不必知道准确的故障时间或右删失时刻,对其可靠度函数的估计方法主要是寿命表法^[18].

由于随机右删失数据是可靠性数据分析中最常见的类型,因此本文只针对该情况下的可靠度函数计算方法作重点分析.残存比率法在估计可靠度函数时,需要对样本进行分组,对样本数量有着严格的规定^[19],本文也不再对其进行对比分析.

2.1 平均秩次法

平均秩次法(mean rank order, MRO)是一种在随机删失条件下可靠性评估的计算方法,该方法最初用于估计经验分布函数,由统计学家们总结而得^[1],是目前在航空工程中使用得最广泛的可靠性评估方法之一.用该方法估计可靠度函数的公式为

$$R_n(t_k) = \frac{A_k - 0.3}{n + 0.4} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} A_k = A_{k-1} + \Delta A_k \\ \Delta A_k = \frac{n+1-A_{k-1}}{n-i+2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 n 指样品的故障总数, A_k 指故障样品的平均秩次,下标 k 代表故障样品的顺序号, i 指所有产品的排列顺序号,按故障时间和删失时间的大小排列.

2.2 Kaplan-Meier 估计

对于删失数据的可靠性评估,可靠度函数的估计式由 Kaplan 和 Meier 首先提出的,称为 Kaplan-Meier 估计,简称 KM 估计.

KM 估计要求数据全部是右删失数据.对来自总体的 n 个产品的寿命进行观测,得到 $t_1, t_2, \dots, t_n$. 当 t_i 是故障数据时,令 $\delta_i = 1$; 当 t_i 是右删失数据时,令 $\delta_i = 0$. 将这些 t_i 从小到大排列,可靠度函数 $R(t)$ 的 KM 估计如下:

$$\hat{R}(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0, t_{(1)}) \\ \prod_{i=1}^j \left(\frac{n-i}{n-i+1} \right)^{\delta_i} & t \in [t_{(j)}, t_{(j+1)}) \\ 0 & t \in [t_{(n)}, \infty) \end{cases} \quad j = 1, \dots, n-1 \quad (7)$$

2.3 Herd-Johnson 估计

对于右删失数据的估计, Herd 又提出了一种概率分布方法,后来这种方法被 Johnson 所推广.该方法一般称为 Herd-Johnson 估计,简称 HJ 估计.其主要思路如下:

假设一组随机删失数据共有 n (样品的故障总数) 个样本量,把它们按从小到大的顺序排列,

使最小的次序记为 n , 第 2 个记为 $n-1$, 依次类推,最大的记为 1. 第 i 次损坏记为 r_i , 可靠度函数的 HJ 估计可用下式来表示

$$R_i = [r_i / (r_i + 1)] \times R_{i-1} \quad (8)$$

且 $R_0 = 1$. 观察即可发现,该方法与 KM 估计非常类似,因此,其形式又可表示为下式所示:

$$\hat{R}(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0, t_{(1)}) \\ \prod_{i=1}^j \left(\frac{n-i+1}{n-i+2} \right)^{\delta_i} & t \in [t_{(j)}, t_{(j+1)}) \\ 0 & t \in [t_{(n)}, \infty) \end{cases} \quad j = 1, \dots, n-1 \quad (9)$$

2.4 Nelson-Aalen 估计

Nelson-Aalen 估计最初用于生物统计学中对生存性概率的分析.其基本思想为首先估计累计死亡率,然后再根据生存函数与累积死亡率的对应关系求得生存函数,也即获得了可靠度函数. Nelson-Aalen 估计(简称 NA 估计)在最大的时间观察范围内定义如下:

$$\hat{H}(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_i \\ \sum_{t_j \leq t} \frac{d_j}{n_j} & t \geq t_i \end{cases} \quad (10)$$

式中 d_j 为到时刻 t_j 的失效个数; n_j 为到时刻 t_j 处寿命测试的总个数.

在指数分布下,以累计死亡率的 NA 估计为基础,得到可靠度函数的另一个估计式为

$$\hat{R}(t) = S(t) = \exp[-\hat{H}(t)] \quad (11)$$

3 仿真算法设计

对于明晰小子样随机删失数据下非参数估计方法适用范围的蒙特卡罗仿真算法,本文主要是结合航空发动机现场数据的特点,在竞争性故障模型下,设计了一种模拟航空装备现场寿命数据的产生方法和随机删失数据的仿真流程,以此来对比分析非参数估计方法的优劣,为航空装备现场数据的可靠性评估工作提供理论基础.

K 重威布尔竞争性故障模型是可靠性中用到最多的竞争性故障模型.本文以此为例,设计了一种仿真算法来对比分析非参数估计方法在估计产品平均寿命时的优劣.

假设某航空产品的故障数据服从三重威布尔竞争性故障模型,且满足

$$\begin{cases} m_1 = 2 \times m_2 = \frac{1}{2} \times m_3 \\ \eta_1 = 2 \times \eta_2 = \frac{1}{2} \times \eta_3 \end{cases} \quad (12)$$

其可靠度函数可表示为

$$R(t) = \exp\left[-\sum_{i=1}^K\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{m_i}\right]$$

(13)

本文产生随机删失数据的主要思路是

1) 随机产生服从形状参数与尺度参数分别为 m_1 与 η_1 的两参数威布尔分布的 K 个随机数, 记为 $T' = (T'_1, \dots, T'_n)$.

2) 随机产生服从形状参数与尺度参数分别为 m_2 与 η_2 的两参数威布尔分布的 K 个随机数, 记为 $T'' = (T''_1, \dots, T''_n)$.

3) 随机产生服从形状参数与尺度参数分别为 m_3 与 η_3 的两参数威布尔分布的 K 个随机数, 记为 $T''' = (T'''_1, \dots, T'''_n)$.

4) 令 $T_i = \min(T'_i, T''_i, T'''_i)$, 认为其为观察失效数据.

5) 重复步骤 1)~步骤 4), 利用同样的方法继续产生服从与 T_i 相同分布的随机数, 记为 $T^+ = (T^+_1, \dots, T^+_n)$.

6) 观测到的随机删失数据为

$$S_i = \min(T_i, T^+_i)$$

(14)

7) 删失比是指在现场数据随机截尾试验中删除的样品和总样品的比值. 该方法产生的随机删失数据, 其删失比为 0.5. 为控制删失比的值, 随机产生一组不重复的数 $L = (L_1, L_2, \dots, L_M)$, 确保在这些位置不会出现删失.

8) 分别用平均秩次法、KM 估计、HJ 估计、NA 估计计算可靠度函数.

9) 在上述非参数估计方法计算可靠性函数的基础上, 用下式估计产品的平均寿命

$$E_t \approx t_1 + \sum_{i=1}^{n-1} R(t_i)(t_{i+1} - t_i)$$

(15)

10) 对上述步骤进行 N 次独立重复计算, 分别计算得到 4 种非参数方法在 N 次仿真计算的平均寿命.

11) 根据删失比、样本量、分布的参数不同, 共仿真了多组数据, 仿真模型中各个参数的选取值根据不同的分布分别设定.

12) 为了评价随机删失数据情形下 4 种非参数估计方法的优劣, 在一定样本量和删失比下对上述仿真方法做多次仿真, 然后用其结果的平均值与均方误差来评价方法的优劣. 例如, 对于其均方误差为

$$E_{\text{ms}}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{\theta}_i - \theta_{\text{re}})^2$$

(16)

其中 $\hat{\theta}_i$ 是用非参数估计的平均寿命的平均值. θ_{re}

是用于仿真计算的真实平均寿命. 真实的平均寿命则由公式(16)求得. N 是算法独立重复运行的次数, 本文中 N 为 3 000.

4 仿真实例

由于删失比、样本量、威布尔分布的参数不断变化, 本文分别在不同情况下进行 N 次独立重复参数估计, 仿真算法中样本量、删失比、威布尔分布参数的选取如表 1 所示.

表 1 仿真模型中各个参数的选取值

Table 1 Selection of parameters in simulation models

参数	数据选取
删失比	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
样本量	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
形状参数 m_1	1.5, 2.5, 3.5, 4.5
尺度参数 η_1	2 000

整个仿真结果如表 2 所示, 通过对计算结果的对比分析, 分别从样本量、删失比、威布尔分布参数 3 个角度来评判 4 种非参数估计方法的优劣.

4.1 删失比不同

当样本量为 20, 形状参数 m_1 为 1.5, 尺度参数 η_1 为 2 000 时, $m_2 = 0.75$, $\eta_2 = 1\,000$, $m_3 = 3$, $\eta_3 = 4\,000$. 用不同的非参数估计方法在不同删失比下威布尔竞争性故障模型平均寿命均值与均方误差分别作图 1 与图 2 所示.

从图中不难看出, KM 估计平均寿命均方误差最小. 但是从平均寿命来看, 用参数估计的标准值介于平均秩次法与 KM 估计中间, 并且平均秩次法偏大, KM 估计偏小. 随着删失比的不断增大, 其均方误差也不断上升.

4.2 样本量不同

当删失比为 0.2, 形状参数 m_1 为 1.5, 尺度参数 η_1 为 2 000 时, $m_2 = 0.75$, $\eta_2 = 1\,000$, $m_3 = 3$, $\eta_3 = 4\,000$. 用不同的非参数估计方法在不同样本量下威布尔竞争性故障模型平均寿命均值与均方误差分别作图 3 与图 4 所示. 从图中也不难看出, KM 估计的平均寿命的标准值也是介于平均秩次法与 KM 估计中间, 并且平均秩次法的估计结果偏大, KM 估计结果偏小. 从均方误差的角度看, KM 估计的均方误差与平均秩次法基本一致, 并且都随着样本量的不断增大, 均方误差也是越来越小. 而 HJ 估计与 NA 估计偏大的都比较大.

4.3 混合威布尔分布形状参数不同

当样本量为 20,删失比为 0.2,尺度参数 η_1 为 2000 时,用不同的非参数估计方法在不同形

状参数下平均寿命值与均方误差分别作图 5 与图 6 所示. 从图中也不难看出,其结论与不同删失比、不同样本量下类似.

表 2 竞争性故障模型下仿真模型平均寿命的非参数估计方法对比

Table 2 Comparison of nonparametric estimation method of mean life time of simulation model in competitive fault model

类型	样本量	删失比	m_1	θ_{re}	$E_{t,mro}$	$E_{t,KM}$	$E_{t,HJ}$	$E_{t,NA}$	$E_{ms,mro}$	$E_{ms,KM}$	$E_{ms,HJ}$	$E_{ms,NA}$
删失比变化	20	0.1	1	685.2	698.1	640.1	751.0	811.2	49313.9	41720.9	57150.3	68248.6
	20	0.2	1	689.2	705.2	640.1	755.9	828.5	60710.0	48287.4	70079.8	89046.0
	20	0.3	1	674.3	687.5	624.5	733.0	813.1	79499.0	61591.9	90891.4	121304.9
	20	0.4	1	637.4	638.1	586.3	676.8	756.3	96763.1	76331.2	109539.7	151729.0
样本量变化	10	0.2	1	702.4	719.3	661.7	804.4	888.4	138613.5	115664.6	174209.6	222368.7
	20	0.2	1	690.1	702.2	637.6	752.7	824.8	60061.7	47900.2	69288.8	87967.2
	30	0.2	1	670.8	686.3	628.4	723.0	782.7	37745.2	30557.5	42115.2	51950.4
	40	0.2	1	657.6	678.8	628.0	707.9	758.4	27408.2	22756.9	29940.7	36010.6
	50	0.2	1	649.3	668.3	622.5	692.6	736.7	21995.9	18657.6	23708.5	27879.5
	60	0.2	1	643.5	664.8	622.8	685.8	725.3	17978.4	15477.7	19187.6	22246.9
	70	0.2	1	637.6	661.1	622.7	679.6	715.1	14857.6	12842.8	15769.8	18128.7
	80	0.2	1	632.6	655.3	620.0	671.9	704.1	13056.7	11481.2	13764.2	15569.7
	90	0.2	1	630.0	651.5	618.6	666.5	696.1	11129.8	9872.9	11672.7	13098.3
	100	0.2	1	626.9	647.4	616.5	661.2	688.7	9846.8	8839.7	10290.1	11437.8
形状参数变化	20	0.2	0.5	580.4	613.7	509.5	670.7	768.6	68528.9	44949.3	82366.0	113171.9
	20	0.2	1.5	776.0	774.0	729.2	822.0	880.6	23835.8	22615.1	26371.6	29963.5
	20	0.2	2.5	868.5	847.1	823.7	889.6	931.8	16443.4	16466.8	17770.1	19284.1
	20	0.2	3.5	909.6	886.7	873.9	924.4	956.9	12015.0	12114.9	12870.1	13802.8
	20	0.2	4.5	927.3	908.3	901.2	942.0	968.4	9159.6	9178.0	9728.9	10466.5

注: m_1 为仿真模型中的形状参数;尺度参数 η_1 固定为 2000; $E_{t,mro},E_{t,KM},E_{t,HJ},E_{t,NA}$ 分别为用平均秩次法,Kaplan-Meier 估计,Herd-Johnson 估计,Nelson-Aalen 估计计算出来的平均寿命的均值; $E_{ms,mro},E_{ms,KM},E_{ms,HJ},E_{ms,NA}$ 则分别是 4 种方法计算出来的平均寿命的均方误差.

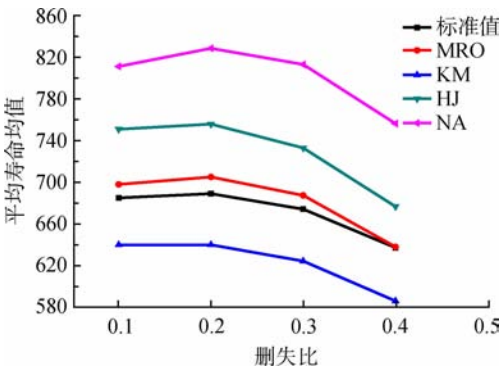


图 1 不同删失比下平均寿命均值

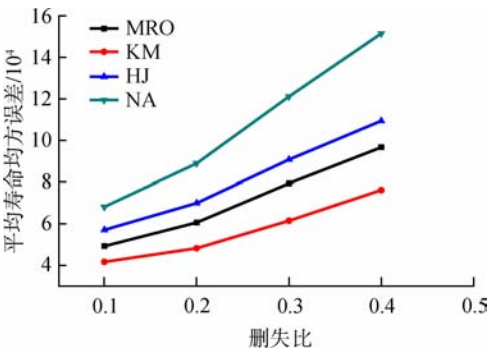


图 2 不同删失比下平均寿命均方误差

Fig. 1 Average value of mean life time in different censoring rate

Fig. 2 Mean square error of mean life time in different censoring rate

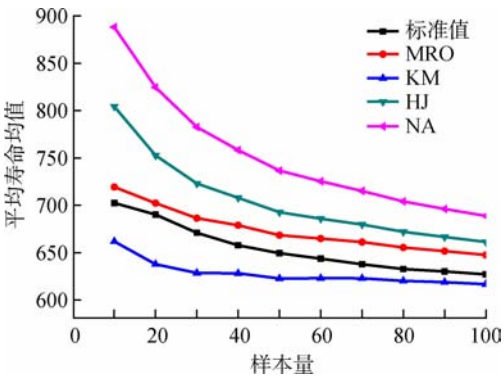


图 3 不同样本量下平均寿命均值

Fig. 3 Average value of mean life time in different sample sizes

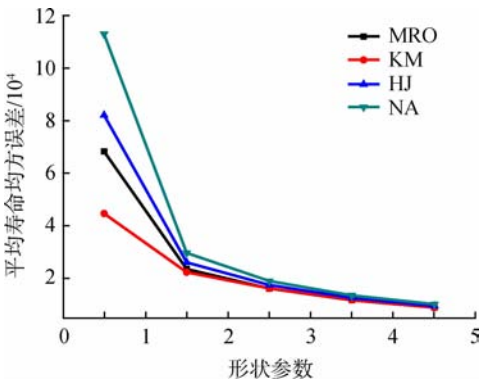


图 6 不同形状参数下平均寿命均方误差

Fig. 6 Mean square error of mean life time in different shape parameters

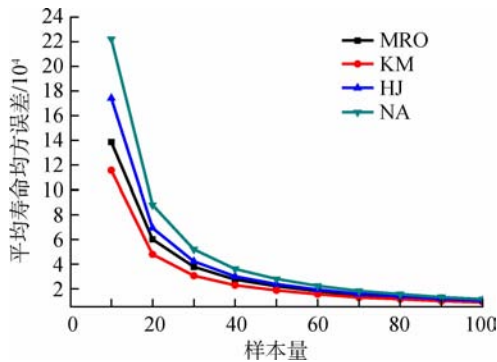


图 4 不同样本量下平均寿命均方误差

Fig. 4 Mean square error of mean life time in different sample sizes

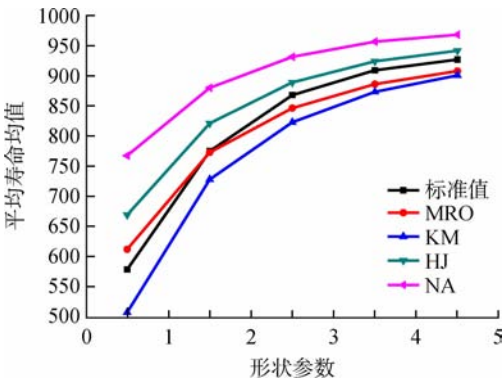


图 5 不同形状参数下平均寿命均值

Fig. 5 Average value of mean life time in different shape parameters

的优劣顺序依次是 KM 估计、平均秩次法、HJ 估计、NA 估计。

5 工程应用案例

航空发动机某部件由 A,B,C 三个子部件串联而成。同时,该部件每一个子部件若发生故障,则整个部件不能正常运行,即会发生失效。该失效模式属于竞争性故障模型。在设计早期,可以收集到该航空发动机部件少量的故障数据。表 3 中所示数据为部件工作到对应时间时发生故障或出现删失。但是,并不知道当时是由于哪个子部件发生故障才导致整个部件出问题。

表 3 航空发动机某部件故障数据

Table 3 Failure data of the components of aero-engine

序号	故障时间/h	删失	序号	故障时间/h	删失
1	1.0		11	230.0	
2	23.3	✓	12	275.5	
3	27.4	✓	13	323.4	
4	39.3		14	339.0	
5	67.3	✓	15	372.8	✓
6	73.2		16	722.8	✓
7	85.3		17	748.2	✓
8	148.9	✓	18	771.6	
9	180.0		19	1164.8	
10	223.0		20	1643.1	

由于并不知道故障发生在 3 个子部件的哪一个,也不知道该子部件的故障模式和分布类型。因此,本文并不能对其进行分布假设检验,然后进行参数估计,计算该部件的可靠性。如果分布判断错

综上所述,威布尔竞争性故障模型下的仿真计算结果表明,在不同删失比、不同样本量与不同形状参数下,KM 估计计算结果平均寿命均方误差最小。对于平均寿命均值,平均秩次法与 KM 算法离标准值都比较近。在该条件下,这几种方法

误,将会使计算结果出现错误.此时,选用非参数估计方法是一个工程实践中应用的较为广泛的解决方案.

由上述仿真结果得知,平均秩次法和 Kaplan-Meier 估计在处理此类问题时表现较好,因此选用这两种方法进行可靠性评估.由式(5)和式(7)可得,该部件在不同时刻的可靠度如表 4 所示.

表 4 航空发动机某部件可靠度

Table 4 Reliability of the components of aero-engine

故障时间/h	平均秩次法	Kaplan-Meier 估计
1. 0	0. 966	1. 000
39. 3	0. 911	0. 941
73. 2	0. 853	0. 878
85. 3	0. 795	0. 816
180. 0	0. 733	0. 748
223. 0	0. 671	0. 680
230. 0	0. 609	0. 612
275. 5	0. 546	0. 544
323. 4	0. 484	0. 476
339. 0	0. 422	0. 408
771. 6	0. 312	0. 272
1 164. 8	0. 203	0. 136
1 643. 1	0. 094	0

同时可得上述两种非参数估计方法计算该航空发动机部件的平均寿命分别为 654 h 和 604 h.

实际上,随着设计过程的深入和故障数据的不断增多,后来才逐渐了解到该部件的 3 个子部件寿命数据属都于威布尔分布,且估计了该部件的平均寿命(606 h)和在不同时刻的可靠度.

将设计早期采用平均秩次法和 Kaplan-Meier 估计部件的可靠度与真实可靠度进行对比,如图 7 所示.从图中可以看出,在不知道寿命分布类型的设计早期,采用平均秩次法和 Kaplan-Meier 估计算法都能较为精确地估计部件可靠性.同时,在设计早期用上述两种算法对该部件的平均寿命估计也较为准确,且 KM 算法更接近实际值.

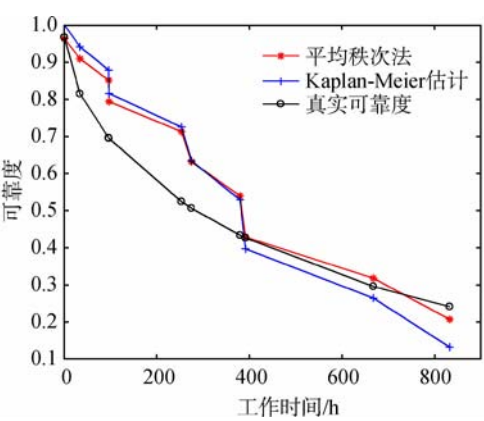


图 7 航空发动机某部件可靠度曲线
Fig. 7 Curve of reliability of the components of aero-engine

6 结 论

本文在竞争性故障模型下,设计了一种明晰小子样随机删失数据下非参数估计方法适用范围的蒙特卡罗仿真算法.并以此来对比分析航空发动机可靠性评估中非参数估计方法的优劣,为小子样随机删失数据下航空发动机可靠性评估方法的选择提供了良好的参考,得到结论如下:

- 1) 非参数估计方法的评估精度随着样本量的增大而不断提高,且在样本量达到 30 以后,4 种非参数估计方法的均方误差都较小,4 种非参数估计方法都适合于随机删失数据下的可靠性评估.
- 2) 在三重威布尔竞争性故障模型和不同删失比、不同形状参数下,当样本量在 30 以下的小子样随机删失数据时,这几种非参数估计方法的优劣顺序依次是 KM 估计、平均秩次法、HJ 估计、NA 估计.

参考文献:

[1] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
[2] Gebizlioglu O, Şenoglu B, Kantar Y. Comparison of certain value-at-risk estimation methods for the two-parameter Weibull loss distribution[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2011, 235(11): 3304-3314.
[3] 王治华,傅惠民,黄蓉. 性能退化双线性过程方法与成组试验方法的比较[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1562-1566.
WANG Zhihua, FU Huimin, HUANG Rong. Comparison of bilinear process method and group test method for performance degradation[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(7): 1562-1566. (in Chinese)
[4] 刘洪于,方洋旺,张平. 基于导弹现场数据的可靠性评估

[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(4):41-45.

LIU Hongyu,FANG Yangwang,ZHANG Ping. The reliability assessment based on missile field data[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition,2012,13(4):41-45. (in Chinese)

[5] HAN Fengyan,QIN Zheng,WANG Xin. A censored non-parametric software reliability model [J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2006, 11 (4):227-233.

[6] WANG Yongqiao,WANG Shouyang,DANG Chuangyin. Nonparametric quantile frontier estimation under shape restriction[J]. European Journal of Operational Research, 2014,232(3):671-678.

[7] HAN Fengyan,LI Weisong. Nonparametric estimation for hazard rate monotonously decreasing system[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2005, 16 (1): 220-223.

[8] Amiri A, Crambes C, Thiam B. Recursive estimation of nonparametric regression with functional covariate [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2014, 69 (1): 154-172.

[9] Shoji I. Nonparametric estimation of nonlinear dynamics by metric-based local linear approximation [J]. Statistical Methods and Applications,2013,22(3):341-353.

[10] Frydman H,LIU Jun. Nonparametric estimation of the cumulative intensities in an interval censored competing risks model[J]. Lifetime Data Analysis,2013,19(1):77-79.

[11] WANG Chunjie,SUN Jianguo,SUN Liuquan. Nonparametric estimation of current status data with dependent censoring[J]. Lifetime Data Analysis,2012,18(4):434-445.

[12] Gibbons D I,Vane L C. A simulation study of estimators for the 2-parameter Weibull distribution[J]. IEEE Transaction on Reliability,1981,30(1):61-66.

[13] 王卓健,沈安慰,郭基联. 基于机群仿真模型的平均秩次法有效性分析[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(5):1128-1132.

WANG Zhuojian,SHEN Anwei,GUO Jilian. Analysis of validity with mean rank order method based on air fleet simulation model[J]. Systems Engineering and Electronics,2013,35(5):1128-1132. (in Chinese)

[14] SHEN Anwei,GUO Jilian,JIA Lintong. Application and validity analysis of EM algorithm in reliability evaluation of aviation equipment[R]. Emeishan, Sichuan: The Proceedings of International Conference on Quality,Reliability,Risk,Maintenance and Safety Engineering,2013.

[15] 沈安慰,王卓健,郭基联. 参数估计方法对比研究[J]. 计算机仿真,2013,30(9):239-243.

SHEN Anwei,WANG Zhuojian,GUO Jilian. Comparison research on parameter estimation method[J]. Computer Simulation,2013,30(9):239-243. (in Chinese)

[16] 文昌俊,钟毓宁,刘文超. 现场数据可靠性分析非参数方法比较[J]. 湖北工学院学报,2002,17(4):31-33.

WEN Changjun,ZHONG Yuning,LIU Wenchao. Reliability analysis techniques of field data[J]. Journal of Hubei Polytechnic University,2002,17(4):31-33. (in Chinese)

[17] 沈安慰,郭基联,王卓健. 航空装备现场数据可靠性评估方法有效性分析[J]. 航空学报,2014,35(5):1311-1318.

SHEN Anwei,GUO Jilian,WANG Zhuojian. Validity analysis of reliability evaluation in aviation equipment field data[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2014,35 (5):1311-1318. (in Chinese)

[18] 王燕萍,吕震雷,赵新攀. 基于 Markov Chain Monte Carlo 的幂律过程的 Bayesian 分析[J]. 航空动力学报,2010,25 (1):152-159.

WANG Yanping,LÜ Zhenzhou,ZHAO Xinpan. Bayesian analysis for the power law process based on Markov Chain Monte Carlo[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25 (1):152-159. (in Chinese)

[19] Weatherford L R,Polt S. Better unconstraining of airline demand data in revenue management systems for improved forecast accuracy and greater revenues[J]. Journal of Revenue and Pricing Management,2002,1(3):234-254.

(编辑:秦理曼、王碧琚)