

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.02.018

基于继承因子的飞机弹射救生座椅可靠性 Bayes 评估

雷华金¹ 马芳云¹ 王文胜¹ 董海平²

(1. 航宇救生装备有限公司, 襄樊, 441003;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京, 100081)

摘要:为了更有效地解决飞机弹射救生座椅可靠性评估的问题,考虑飞机弹射救生座椅子系统试验数据与系统试验数据之间既有联系又有区别的特点,采用继承因子描述这两种试验数据之间的相似性,建立了一种基于继承因子的飞机弹射救生座椅 Bayes 可靠性评估方法。采用该方法对某型飞机弹射救生座椅可靠性进行了评估,在置信度 90%的情况下其可靠度下限达到了 0.954。结果表明,在相同的系统级试验样本量情况下,评估结果比经典统计方法更合理。

关键词:飞机弹射救生座椅;可靠性评估;继承因子;Bayes 评估方法

中图分类号:V244.21+2

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2017)02-0264-05

Bayesian Method for Reliability Assessment of Life-Saving Ejection Seat of Fighter Plane Based on Inheritance Factor

LEI Huajin¹, MA Fangyun¹, WANG Wensheng¹, DONG Hai ping²

(1. HANGYU Life-Saving Equipment Lim. Corp., Xiangfan, 441003, China;

2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract: To solve the problem of reliability assessment of life-saving ejection seat of fighter plane, inheritance factor is adopted to describe the similarity between the test data of subsystems of life-saving ejection seat of fighter plane and that of the whole seat. A Bayesian reliability assessment method for life-saving ejection seat of fighter plane based on inheritance factor is put forward. The method combines the reliability information of whole seat and its subsystems using inheritance factor. With the new method, the reliability of a life-saving ejection seat of fighter plane is evaluated and it reaches 0.954 under the confidence level 0.90. The result shows that it is more rational with new method than with classical statistical method and it is feasible to use the new method to evaluate the reliability of life-saving ejection seat of fighter plane.

Key words: life-saving ejection seat of fighter plane; reliability assessment; inheritance factor; Bayesian assessment method

飞机弹射救生座椅是战斗机在处于不可挽回情况下使飞行员弹离飞机以挽救飞行员生命的一种装置,是军用飞机救生系统的关键装置。按

GJB1130-1991《飞机弹射救生系统可靠性和维修性通用要求》中的规定,飞机弹射救生座椅在设计定型时根据试验结果评估的可靠度在置信度 90%

收稿日期:2016-05-30; **修订日期:**2017-02-01

通信作者:雷华金,男,研究员, E-mail: wangwanshengt513-2@163.com。

引用格式:雷华金,马芳云,王文胜,等. 基于继承因子的飞机弹射救生座椅可靠性 Bayes 评估[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(2): 264-268. LEI Huajin, MA Fangyun, WANG Wensheng, et al. Bayesian method for reliability assessment of life-saving ejection seat of fighter plane based on inheritance factor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(2): 264-268.

情况下应不低于 0.90^[1]。由于飞机弹射救生座椅的系统级试验是一次性的,受费用及研制进度等因素的限制,其在研制过程中一般会结合试验与数值模拟^[2]的方式进行,系统级试验数量一般较少,当采用基于二项分布的经典评估方法对其可靠性进行评估时,只能利用这些系统级试验数据,常导致可靠性评估结果过于保守,在设计定型时根据试验结果评估的可靠度在置信度 90% 情况下达不到 GJB1130 规定的要求,影响飞机弹射救生座椅的正常设计定型。

实际上,由于系统级试验费用太高,当要验证飞机弹射救生座椅系统的功能和可靠性时,为了尽量避免在系统级试验中出现故障,在研制过程中一般会对各子系统进行充分的功能验证试验和可靠性验证试验,最后通过这些子系统的试验与少量的系统级试验共同来保证飞机弹射救生座椅的可靠性,这也是工程中既能保证可靠性又能减少试验费用的行之有效的办法。上述基于二项分布的经典评估方法忽略了子系统试验数据,仅仅利用了系统级试验数据,致使评估结果不能准确反映飞机弹射救生座椅真实的可靠性水平。为了在类似的系统可靠性评估中利用子系统的试验数据,王宇勇^[3]等利用 Lindstrom-Madden(L-M)方法综合利用子系统试验数据,提高了某武器系统可靠性评估精度。李强兵^[4]在评估水下无人自主机器人(Underwater unmanned vehicle, UUV)可靠性时,采用 L-M 法利用各分系统的试验数据,得到了 UUV 系统级的可靠性综合评价。董海平等提出了一种综合利用子系统试验数据和系统级弹射试验数据的 Bayes 可靠性评估方法^[5],在该方法中,根据矩等效原理,把子系统试验数据转换成为系统等效试验数据,然后把该系统等效试验数据作为先验信息,再根据 Bayes 理论评估座椅系统的可靠性。该方法除了利用系统级试验数据外,还利用了子系统试验数据,提高了可靠性评估精度,其评估结果比上述基于二项分布的经典统计方法更接近座椅实际的可靠性水平。但该方法把由子系统试验数据转换而成的系统等效试验数据与现场系统试验数据完全等同看待,视为同母体试验数据,而忽略了两者之间的差异性,使可靠性评估结果存在冒进的可能。而且,这种 Bayes 方法有时会因子系统的试验数据过多使系统级试验信息对系统可靠性评估不敏感^[6,7],为了克服这种先验信息淹没现场信息的情况,本文考虑这两种试验数据之间既有联系又有区别的特点,引入继承因子来描述这两种试验数据之间的相似性,提出一种基于继承因子的飞机弹射救生座椅 Bayes 可靠性评估方法,通过继承因子来

限制对先验信息的利用,建立基于继承因子的先验分布,结合系统级试验数据,推导出基于继承因子的后验分布,最后基于该后验分布对飞机弹射救生座椅系统可靠性进行评估。

1 基于继承因子的飞机弹射救生座椅 Bayes 可靠性评估

1.1 先验分布确定

Bayes 可靠性评估方法的思路是先收集系统历史可靠性信息,再通过信息融合方法把这些信息转换为系统可靠性先验信息,根据该先验信息确定系统可靠性先验分布,然后结合系统当前试验数据,利用 Bayes 定理,确定系统可靠性后验分布,最后基于后验分布对系统可靠性进行综合评估^[8-10]。

Bayes 可靠性评估方法的关键在于利用先验信息确定先验分布。对于像飞机弹射救生座椅这类成败型试验的总体(一般视为服从二项分布),工程应用中,为了便于计算,先验分布通常采用系统试验成功概率,即系统可靠度的共轭分布 Beta($R | a, b$),其密度函数为

$$\pi(R) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} R^{a-1} (1-R)^{b-1} \quad (1)$$

式中: R 为飞机弹射救生座椅系统可靠度, $0 < R < 1$; a 和 b 为先验分布的超参数。

超参数是利用先验信息确定的。对二项分布总体而言,从国内外有关的文献中可以看到,可以通过多种方法确定先验分布中超参数 a 和 b ,如:矩拟合法、分位数法、经验贝叶斯法等一些常用的方法^[11]。一种工程上简单的做法是通过把飞机弹射救生座椅子系统试验数据折合成系统等效试验数据,即通过系统历史样本,确定超参数 a 为系统历史样本中的试验成功数, b 为试验失败数。对某个型号飞机弹射救生座椅来说,各子系统试验与系统试验,在功能、性能、结构、试验应力等方面都具有一定的相似性,与系统可靠性特性有关的子系统试验数据及其折合成的系统等效试验数据与系统试验数据也会具有一定的相似性,但由于子系统的试验条件、工作应力等与系统试验不完全一致,因此由子系统折合成的系统等效试验数据与系统试验数据也不会完全一致,因此不能像传统的 Bayes 方法那样把这两种试验数据视为完全等同看待,而应该是有条件的“继承”。从数理统计学的角度来看,由子系统试验数据折合成的系统等效试验数据和系统试验数据可以看成是由两个不同总体产生的样本数据,参考文献^[12]的做法,采用继承因子来描述这两种试验数据之间的相似性,通过两个总体的同总体拟合优度检验的方法来确定继承因子。

1.2 继承因子的定义及确定方法

继承因子 ρ 定义为由飞机弹射救生座椅各子系统折合而成的系统等效试验数据与实际系统试验数据之间的相似度,即系统历史样本与当前样本两个总体之间的相似程度的度量。当 $\rho=0$ 时,历史样本与当前样本完全不同,在飞机弹射救生座椅可靠性评估中系统历史样本完全不可用;当 $0<\rho<1$ 时,历史样本与当前样本有一定程度的相似性,历史样本可以通过继承因子部分使用;当 $\rho=1$ 时,历史样本与当前样本完全相同,历史样本可以与当前样本视为等同看待,在飞机弹射救生座椅可靠性评估中完全使用,可见继承因子对飞机弹射救生座椅可靠性评估的结果有着较大的影响。本文采用历史样本与当前样本两个样本的卡方拟合优度检验,给出了确定继承因子 ρ 的方法^[12]。

记历史样本 (m, y) 来自总体 Y , m 为试验数, y 为成功数, $f' = m - y$ 为失败数;当前样本 (n, x) 来自总体 X , n 为试验数, x 为成功数, $f = n - x$ 为失败数。

原假设 H_0 : X 与 Y 是相同的总体。检验统计量为^[13]

$$K = \frac{(x \cdot f' - y \cdot f)^2 \cdot (m + n)}{(x + y) \cdot (f + f') \cdot m \cdot n} \quad (2)$$

K 依分布收敛到自由度为 1 的卡方分布。给定检验水平 α , 有

$$\begin{cases} K > \chi_1^2(\alpha) & \text{拒绝 } H_0 \\ K \leq \chi_1^2(\alpha) & \text{接受 } H_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\chi_1^2(\alpha)$ 为自由度为 1 的卡方分布的 α 分位点。

式(2)中要求 x, y, f, f' 都应大于 5。若不能满足这一条件,则需要 Yates 修正^[14]

$$K = \frac{\left[|x \cdot f' - y \cdot f| - \frac{m+n}{2} \right]^2 \cdot (m+n)}{(x+y) \cdot (f+f') \cdot m \cdot n} \quad (4)$$

式中: K 近似服从自由度为 1 的卡方分布。以下使用到的 K , 均如式(4)中的定义。上述检验问题中,一个略小于 $\chi_1^2(\alpha)$ 的 K 和一个远小于 $\chi_1^2(\alpha)$ 的 K , 意义有所不同,后者支持原假设的理由更为强烈,令

$$Q(K) = P\{\chi_1^2 > K\} \quad (5)$$

称为该检验的拟合优度, $Q(K)$ 越大,支持原假设的证据就越强烈。继承因子 ρ

$$\rho = \sqrt{Q(K)} \quad (6)$$

1.3 基于继承因子的飞机弹射救生座椅可靠性后验分布确定及其可靠性评估

考虑了历史样本与当前样本之间的继承因子

后,式(1)表示的二项分布总体的先验分布就变成了混合先验分布,该混合先验分布的概率密度函数如式(7)所示

$$\pi_\rho(R) = \rho \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} R^{a-1} (1-R)^{b-1} + (1-\rho) \quad (7)$$

式中: $0 \leq \rho \leq 1$ 为继承因子。

从式(7)中可以看出,混合先验分布是基于历史样本所得的 $\text{Beta}(R | a, b)$ 与基于 Bayes 假设的 $[0, 1]$ 上的均匀分布 $\text{Beta}(R | 1, 1)$ 的加权和。继承因子反映历史样本与当前样本的相似程度。对于两个极端的情形: $\rho=1$, 认为两总体完全相同,此时混合先验就是共轭先验 $\text{Beta}(R | a, b)$, 也就是完全使用历史样本作为先验信息; $\rho=0$, 则认为两总体完全不同,此时混合先验就是 $[0, 1]$ 上的均匀分布,也就是完全不用历史样本,在无先验信息的情况下,基于 Bayes 假设确定先验分布。而 $0 < \rho < 1$ 则是介于两者之间的情形,即:两总体是相似(或者说是相近)的,此时部分的使用历史样本中的信息。因此,使用混合先验分布 $\pi_\rho(R)$ 比传统的共轭先验分布 $\text{Beta}(R | a, b)$ 更为合理。

根据式(7)所给出的混合先验分布,取得实际的系统试验数据(样本) (N, S) , N 为试验数, S 为成功数, $F = N - S$ 为失败数,就可以导出基于继承因子的混合后验分布的概率密度函数如式(8)所示

$$\pi_\rho(R | S, F) = \frac{M \text{Beta}(S+1, F+1)}{M+N} + \frac{N \text{Beta}(a+S, b+F)}{M+N} \quad (8)$$

式中: $M = (1-\rho)\beta(a, b)\beta(S+1, F+1)$, $N = \rho\beta(a+S, b+F)$, $\beta(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)}$ 。其中: ρ 为

由各子系统折合而成的系统等效试验数据与实际的飞机弹射救生座椅试验数据之间的继承因子;

$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$ 为伽玛函数。

由式(8)可以看出,基于继承因子的混合后验分布的概率密度函数 $\pi_\rho(R | S, F)$ 也是两个后验概率密度函数的加权和。

得到了混合后验概率密度函数后,飞机弹射救生座椅可靠性评估问题就是基于该混合后验密度进行统计推断的问题。给定置信度 γ 后,飞机弹射救生系统可靠度下限 R_L 为

$$\int_0^{R_L} \pi_\rho(R | S, F) dR = \int_0^{R_L} \frac{M \text{Beta}(S+1, F+1)}{M+N} + \frac{N \text{Beta}(a+S, b+F)}{M+N} = 1 - \gamma \quad (9)$$

式中: a 为由各子系统折合而成的系统等效试验成功数; b 为失败数; S 为实际的飞机弹射救生座椅试验成功数; F 为失败数。

2 某型飞机弹射救生座椅可靠性评估

某型飞机弹射救生座椅的研制阶段,积累了不少各子系统的试验数据,首先按该型飞机弹射救生座椅系统可靠性结构采用 Combined MML and SR (CMSR)方法^[9]把各子系统试验数据折合为系统等效试验数据,然后按 1.2 节给出的方法确定历史样本和当前样本的继承因子 ρ 。然后,结合当前的试验数据,得到如式(8)所示的基于继承因子的混合后验密度概率函数,最后根据式(9)计算飞机弹射救生座椅的可靠度下限。

该型飞机弹射救生座椅主要由弹射操纵系统,组合式弹射机构,约束系统,稳定系统,射伞和人椅分离系统,高速气流防护系统,氧气系统,座高调节系统等子系统组成。各子系统试验数据如表 1 所示。

表 1 各子系统试验数据
Tab. 1 Test data of subsystems

序号	子系统名称	试验数据(成功数,失败数)
1	弹射操纵机构	(100,0)
2	组合式弹射机构	(116,0)
3	约束系统	(300,0)
4	稳定系统	(200,0)
5	射伞和人椅分离系统	(35,0)
6	高速气流防护系统	(70,0)
7	氧气系统	(40,1)
8	座高调节系统	(50,0)

采用 CMSR 方法,将各子系统的试验数据折合为系统等效试验数据 $(n, s, f) = (35.897\ 4, 35, 0.897\ 4)$, 则 $\text{Beta}(R | a, b)$ 中的超参数 $a = s = 35$, $b = f = 0.897\ 4$ 。系统的实际试验数据为 $N = 13$, $S = 13$ 。按第 1 节中的方法,计算检验的拟合优度 $Q(K) = 0.565\ 1$,由式(6)可得继承因子 $\rho = 0.751\ 7$ 。把 ρ 和 (N, S) 代入式(9),可得置信度 90% 情况下,该型飞机弹射救生座椅可靠度下限 $R_L = 0.954$ 。

作为对比,本文分别采用 3 种不同可靠性评估方法对该型飞机弹射救生座椅的可靠性进行了评估,所得到的评估结果如表 2 所示。方法 1:基于二项分布的经典可靠性评估方法,该方法只能利用实际系统试验数据,不能利用历史试验数据。方法 2:本文提出的基于继承因子的 Bayes 可靠性综合评估方法,该方法首先根据飞机弹射救生座椅各子系统折合而成的系统等效试验数据与实际的系统

试验数据的相似性确定继承因子,然后再确定混合先验分布,最后基于混合后验分布来评估座椅可靠性,该方法是部分使用了历史试验数据。方法 3:把飞机弹射救生座椅各子系统折合而成的系统等效试验数据与当前的实际的系统试验数据视为等同看待,直接把系统等效试验数据作为先验信息,采用传统 Bayes 方法来评估,该方法完全使用了历史试验数据。

表 2 3 种可靠性评估方法的比较(置信度 90%)
Tab. 2 Comparison of three methods(Confidence level is 90%)

实际系统试验数据		
试验数	成功数	失败数
13	13	0
可靠度评估结果(可靠度下限)		
方法 1	方法 2	方法 3
0.838	0.954	0.957

从表 2 可以看出,方法 1 仅利用了实际的系统试验数据,由该方法得到的可靠度下限最保守,因为该方法利用的可靠性信息量最少。方法 2 的评估结果介于方法 1 与方法 3 得到的评估结果之间,较为合理,这是因为该方法考虑了飞机弹射救生座椅各子系统折合而成的系统等效试验数据与实际的系统试验数据之间的既有联系又有区别的特点,部分地使用了历史试验数据,较符合工程实际。方法 3 得到的可靠度下限最高,这是因为该方法把系统等效试验数据与实际的系统试验数据视为等同看待,直接使用了历史数据,有过分使用历史数据使评估结果冒进的可能。

3 结束语

本文考虑了飞机弹射救生座椅各子系统折合而成的系统等效试验数据与实际的系统试验数据之间的既有联系又有区别的特点,采用继承因子来描述这两种试验数据之间的相似性,部分地使用历史试验数据作为先验信息,建立了基于继承因子的飞机弹射救生座椅 Bayes 可靠性综合评估方法,并采用该方法对某型飞机弹射救生座椅可靠性进行了评估,在工程应用上更为合理。评估结果与基于二项分布的经典可靠性评估方法和直接使用历史试验数据的传统 Bayes 可靠性评估方法进行对比,采用本文提出的评估方法得到的评估结果介于这两种方法的评估结果之间,既克服了经典可靠性评估方法的保守性,又避免了传统 Bayes 评估方法可能带来的冒进。

参考文献:

[1] 飞机弹射救生系统可靠性和维修性通用要求[S].

- GJB1130-1991. 北京:国防科工委军标出版发行部出版,1991.
- General requirements of reliability and maintenance of plane ejection life-saving system [S]. GJB1130-1991. Beijing: Military Standard Press of Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1991.
- [2] 王一丁,童明波,闫家益,等.某型飞机弹射座椅穿盖弹射试验与数值模拟[J].南京航空航天大学学报,2013,45(3):336-340.
- WANG Yiding, TONG Mingbo, YAN Jiayi, et al. Test and numerical simulation of through canopy ejection for aircraft[J]. Journal of Nanjing Aeronautics & Astronautics, 2013,45(3):336-340.
- [3] 王宇勇,刘立明,石宪华.某复杂武器系统的L-M系统可靠性综合评估及应用[J].水雷战与舰船防护,2013,21(3):79-82.
- WANG Yuyong, LIU Liming, SHI Xianhua. L-M integrated of system reliability and application of certain complex weapon system [J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2013,21(3):79-82.
- [4] 李强兵.基于L-M法的某型UUV系统可靠性评估及应用[J].机械,2015,42(5):32-34.
- LI Qiangbing. Comprehensive evaluation of system reliability and application of a certain UUV based on L-M[J]. Mechanics, 2015,42(5):32-34.
- [5] 董海平,蔡瑞娇,翟志强,等.火箭弹射座椅Bayes可靠性评估方法[J].北京理工大学学报,2007,27(8):671-674.
- DONG Haiping, CAI Ruijiao, ZHAI Zhiqiang, et al. Bayesian reliability assessment method of rocket ejection seat [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007,27(8):671-674.
- [6] BERGER J O. Statistical decision theory and Bayesian analysis [J]. 2nd Edition. New York: Springer-Verlag, 1985:180-195.
- [7] 张金槐,张士峰.验前大容量仿真信息“淹没”现场小子样试验信息问题[J].飞行器测控学报,2003,22(3):1-5.
- ZHANG Jinhuai, ZHANG Shifeng. Problem of large numbers of prior information obliterating the small numbers of test information [J]. Journal of Spacecraft TT&C technology, 2003,22(3):1-5.
- [8] BOX G E P, TIAO G C. Bayesian inference in statistical analysis [M]. New York: Wiley, 1992.
- [9] LI Ming, MEEKER W Q. Application of Bayesian methods in reliability data analyses [J]. Journal of Quality Technology, 2013;46(1):1-13.
- [10] 唐学梅,张金槐,邵凤昌,等.武器装备小子样试验分析与评估[M].北京:国防工业出版社,2001:188-194.
- TANG Xuemei, ZHANG Jinhuai, SHAO Fengchang, et al. Test analysis and evaluation of weapon systems in small-sample circumstances [M]. Beijing: Press of National Defense Industry, 2001: 188-194.
- [11] 周源泉.可靠性评定[M].北京:科学出版社,1990:43-54,62.
- ZHOU Yuanquan. The reliability assessment [M]. Beijing: Science Press, 1990: 43-54, 62.
- [12] 王玮,周海云,尹国举.使用混合Beta分布的Bayes方法[J].系统工程理论与实践,2005,25(9):142-144.
- WANG Wei, ZHOU Haiyun, YIN Guoju. Bayes method with mixed Beta distribution [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2005, 25(9):142-144.
- [13] KLEYNER A, BHAGATH S, GASPARINI M, et al. Bayesian techniques to reduce the sample size in automotive electronics attribute testing [J]. Microelectronics Reliability, 1997,37(6):879-883.
- [14] FISHER R A, YATES F. Statistical tables for biological agricultural and medical research [M]. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1957.

