

燃油调节器可靠性评估研究

西安远东机械制造有限公司 薛建华* 艾先锋 刘一玉

一、验前分布的选取

根据贝叶斯可靠性分析原理,充分利用燃油调节器的有关信息及专家意见和工程经验来分析确定验前分布。对已批量生产使用的航空机械产品,历史资料数据比较充足,我们要利用这些信息,不把估计基于一次试验。由贝叶斯公式 $p(\theta|x) = p(x|\theta)p(\theta)/p(x)$ 知, $p(\theta)$ 是没有得到试验数据以前对参数 θ 的了解,称为验前分布; $p(\theta|x)$ 是已知试验数据后对 θ 的了解,称为验后分布。当已知数据 x 时, $p(x|\theta)$ 是 θ 的函数,称为给定 x 时 θ 的似然函数,记作 $L(\theta|x)$,于是贝叶斯公式可表达为 $p(\theta|x) = L(\theta|x)p(\theta)/p(x)$,即验后分布正比于似然函数与验前分布之积,它区别于古典方法的主要特征是统计模型中多包含了一个 θ 的验前分布。

对某型飞机发动机燃油调节器的厂内台架试验、发动机台架试验和领先使用等调查统计得到表 1 数据。可以认为这批数据是定时截尾有替换试验,其故障次数 r 是强度为 λ 的泊松分布,概率密度为:

$$f(r|\lambda) = e^{-\lambda T} (\lambda T)^r / r! \quad , \quad \lambda > 0 \quad , \quad r = 0, 1, \dots \quad (1)$$

表 1 燃油调节器试验数据表 (t_i 为工作时间; r_i 为故障次数; $\lambda = r_i/t_i$ 为失效率)

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	合计
t_i	1000	1080	3061	2366	2262	1211	1650	2000	500	2050	2007	2166	2186	2000	1890	27429
r_i	0	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	6
$\lambda = r_i/t_i$	0	27.78*	0	0	0	0	6.06*	5.00*	0	0	0	0	0	5.00*	0	2.19*

注: * 的值均 $\times 10^{-4}$ 。

燃油调节器是由许多零部件组成的高可靠性复杂产品,在使用寿命期内耗损影响很小,产品又是可修复的,原有的零部件加上修理过的或新更换的零部件,失效率接近恒定。由现场可靠性数据处理验证,该类型燃油调节器的寿命为指数分布。故认为此型燃油调节器的失效率的验前分布为伽玛分布,其验前分布的概率密度为

$$g(\lambda|\alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \lambda^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda} \quad , \quad \lambda, \alpha, \beta > 0 \quad (2)$$

由贝叶斯定理可得 λ 的验后分布概率密度为

$$g(\lambda|r; \alpha, \beta) = \frac{(T + \beta)^{r+\alpha}}{\Gamma(r + \alpha)} \lambda^{r+\alpha-1} e^{-(T+\beta)\lambda} \quad , \quad \lambda > 0 \quad (3)$$

其中 T 为试验总时间, α 为形状参数, β 为尺度参数。

二、燃油调节器失效率 λ 的评估

对失效率 λ 作评估之前, 必须先要对失效率 λ 的验前分布参数 α β 进行评估, 然后根据失效率 λ 的验后分布作点估计和区间估计。

1 α β 的估计 参照表 1 统计的失效率数据, 根据工程经验和专家意见, 认为燃油调节器的失效率上限值 $\lambda_{\text{上}} = 1.0 \times 10^{-2} f/h$ (式中 f 为失效数, h 为工作时间小时), 且大于这个上限值的概率为 5%, 失效率下限值 $\lambda_{\text{下}} = 1.0 \times 10^{-3} f/h$, 且小于这个下限值的概率为 5%, 那么 $p(\lambda > \lambda_{\text{上}}) = p(\lambda < \lambda_{\text{下}}) = (1.0 - p_0)/2$, 式中 $p_0 = 90\%$ 。并设 $X = \lambda/\lambda_{\text{下}}$, 则

$$\int_{\lambda_{\text{下}}/\lambda_{\text{上}}}^{\lambda_{\text{上}}/\lambda_{\text{下}}} \frac{(\beta\lambda_{\text{下}})^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} X^{\alpha-1} e^{-(\beta\lambda_{\text{下}})X} dX = p_0 \quad (4)$$

再设 $\beta\lambda_{\text{下}} = 1$, 就可从 (4) 式解出 α 而 α 值仅依赖于 $\lambda_{\text{上}}/\lambda_{\text{下}}$ 或 $\lg(\lambda_{\text{上}}/\lambda_{\text{下}})$ 。根据 $\lg(\lambda_{\text{上}}/\lambda_{\text{下}})$ 和 p_0 的值查文献 [1] 所列的附录 C 中的图 C₁ 得 α 值, α 值确定之后解 (4) 式求出 β 的值。我们先设定最低限值为 $1.0 \times 10^{-5} f/h$, 可用简化公式求 β , 即

$$\beta = b_0(1.0 \times 10^{-5} f/h)/\lambda_{\text{下}} \quad (5)$$

式中 b_0 的值可查文献 [1] 附录 C 表 C₃, 用上述公式和已知条件算得 $\lg(\lambda_{\text{上}}/\lambda_{\text{下}}) = \lg(1.0 \times 10^{-2}/1.0 \times 10^{-3}) = 1.0$ 。又知 $p_0 = 90\%$, 查文献 [1] 附录 C 和用 (5) 式计算得 $\alpha = 2.4$, $b_0 = 5.2679 \times 10^5 h$, $\beta = 5267.9 h_0$ 。

2 失效率 λ 的点估计 从失效率 λ 的验后分布概率密度得到失效率 λ 的验后均值和方差分别为

$$E(\lambda|r; \alpha, \beta) = (r + \alpha)/(T + \beta), \quad Var(\lambda|r; \alpha, \beta) = (r + \alpha)/(T + \beta)^2 \quad (6)$$

由表 1 的数据及已知的 α 和 β 值, 用 (6) 式分别计算, 得到失效率 λ 的均值, 方差为

$$\bar{\lambda} = (6 + 2.4)/(27429 + 5267.9) = 2.57 \times 10^{-4}$$

$$\bar{D} = (6 + 2.4)/(27429 + 5267.9)^2 = 0.7 \times 10^{-8}$$

3 失效率 λ 的区间估计 根据失效率 λ 的验后分布概率密度, 设 $\theta = 2\lambda(T + \beta)$, 则关于 θ 的条件分布为

$$g(\theta|r; \alpha, \beta) = (\theta^{2r+2\alpha-1} e^{-\theta/2}) / \{2^{(2r+2\alpha)/2} \Gamma[(2r+2\alpha)/2]\}, \quad \theta > 0 \quad (7)$$

可认为 (7) 式是 $\chi^2(2r+2\alpha)$ 分布, 则 100(1- γ)% 双侧贝叶斯概率区间失效率 λ 的区间估计为

$$\begin{aligned} p(\lambda \leq \lambda_{\text{下}} | r; \alpha, \beta) &= p[2\lambda(T + \beta) \leq 2\lambda_{\text{下}}(T + \beta) | r; \alpha, \beta] \\ &= p[\theta \leq 2\lambda_{\text{下}}(T + \beta) | r; \alpha, \beta] = \gamma/2 \end{aligned}$$

和

$$\begin{aligned} p(\lambda \geq \lambda_{\text{上}} | r; \alpha, \beta) &= p[2\lambda(T + \beta) \geq 2\lambda_{\text{上}}(T + \beta) | r; \alpha, \beta] \\ &= p[\theta \geq 2\lambda_{\text{上}}(T + \beta) | r; \alpha, \beta] = \gamma/2 \end{aligned}$$

那么 $\chi^2_{\gamma/2}(2r+2\alpha) = 2\lambda_{\text{下}}(T + \beta)$, $\chi^2_{1-\gamma/2}(2r+2\alpha) = 2\lambda_{\text{上}}(T + \beta)$

则 $\lambda_{\text{下}} = \chi^2_{\gamma/2}(2r+2\alpha)/2(T + \beta)$, $\lambda_{\text{上}} = \chi^2_{1-\gamma/2}(2r+2\alpha)/2(T + \beta)$ (8)

由前已知 r , T , α , β , γ 的数据, 用 (8) 式计算得到失效率的上、下限值

$$\lambda_{\text{下}} = \chi^2_{0.05}(16.8)/65393.8 = 1.30 \times 10^{-4}$$

$$\lambda_{\text{上}} = \chi^2_{0.95}(16.8)/65393.8 = 4.18 \times 10^{-4}$$

三、燃油调节器可靠度 R 的评估

燃油调节器的寿命服从指数分布, 其可靠度函数 $R(t) = e^{-\lambda t}$, 经变换 $\lambda = -\ln R/t$, 则可靠度 R 的验前分布和验后分布分别为 (9)、(10) 式

$$g(R; \alpha, \beta) = [(\beta/t)^{\alpha} R^{\beta/t-1} (-\ln R)^{\alpha-1}] / \Gamma(\alpha), \quad 1 > R > 0 \quad (9)$$

$$g(R | r; \alpha, \beta) = [(T + \beta)/t]^{\alpha} R^{(T+\beta)/t-1} (-\ln R)^{\alpha-1} / \Gamma(r + \alpha), \quad 1 > R > 0 \quad (10)$$

根据 (10) 式作可靠度 R 的点估计和区间估计。

1 可靠度 R 的点估计 从 (10) 式得到可靠度 R 的均值和方差为

$$R = E(R | r; \alpha, \beta) = [(T + \beta)/(T + \beta + t)]^{r+\alpha} \quad (11)$$

$$Var(R | r; \alpha, \beta) = [(T + \beta)/(T + \beta + 2t)]^{r+\alpha} - [(T + \beta)/(T + \beta + t)]^{2r+2\alpha} \quad (12)$$

由前计算的失效率 λ 值, 依公式 $MTBF = 1/\lambda$ 计算得燃油调节器的 $MTBF = 3891$ 小时, 若燃油调节器连续工作 3891 小时, 其平均可靠度和方差为

$$R = (32696.9/36587.9)^{8.4} = 0.389$$

$$Var = (32696.9/40478.9)^{8.4} - (32696.9/36587.9)^{16.8} = 0.015$$

2 可靠度 R 的区间估计 根据可靠度函数 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 以及失效率 λ 的区间估计值进行可靠度 R 的区间估计, 则

$$R_{\text{下}} = e^{-4.18 \times 10^{-4} \times 3891} = 0.197, \quad R_{\text{上}} = e^{-1.30 \times 10^{-4} \times 3891} = 0.603$$

3 可靠寿命估计 要知道可靠度在 90% 或 99% 范围上的时间 t 值。当 R 给定时, 对应于 $MTBF$ 的 t_R 为

$$t_R = MTBF \ln(1/R) \quad (13)$$

由 (13) 式计算可靠寿命, 则

$$t_{R=0.99} = 3891 \ln(1/0.99) = 39 \text{ 小时}, \quad t_{R=0.9} = 3891 \ln(1/0.90) = 410 \text{ 小时}$$

4 任务可靠度估计 该型飞机完成一次典型任务需用 $t = 1.169$ 小时, 按 $t = 2$ 小时计算, 其任务可靠度为

$$R(2) = e^{-2/3891} = 0.9994$$

从上面估计看出, 燃油调节器的任务可靠度在 3 个 9 以上, 是安全可靠的, 理论估计同飞机的使用状况是相一致的。

参 考 文 献

- [1] Martz H. F. and Waller R. A., "Bayesian Reliability Analysis", John Wiley & Sons, 1982
- [2] 肖德辉, "可靠性工程", 宇航出版社, 1985 年。

FAILURE DETECTION OF ENGINE SENSORS WITH A BANK OF KALMAN FILTERS

Wang Shengyuan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A detection method is presented for sensor failures in FADEC engine. In order to avoid that the output of a fault sensor affects other system states through state feedback, we use a bank of Kalman filters in which different combinations of sensor outputs as inputs of the filters are fed to each filter. According to the characteristics of innovation sequences of each filter, the failure can be detected and isolated. The sample frequencies are different in feedback control path and computation of innovation sequences. When a failure has occurred in one sensor but before the failure affects other system states, the failure can be detected and isolated effectively. Therefore, the effects of failure on the outputs of other sensors are avoided. A digital simulation has been made for a rotational-speed and temperature control system of a twin-spool turbine engine. The simulation results show that this failure detection and isolation method is effective.

STUDY ON THE RELIABILITY EVALUATION OF ENGINE FUEL ACCESSORIES

Xue Jianhua, Ai Xianfeng, Li Yiyu

(Xian Yuan Dong Machine Building Company)

ABSTRACT

Application of Bayes method to the reliability analysis of mechanical products is considered. The key to the application of Bayes statistics—selection of prior probability has been solved by means of comparison and discrimination. Bayes statistics is of universal significance for the reliability analysis of complicated mechanical products. Satisfactory results can be achieved if the proper selection of prior probability is made.

A SIMPLIFIED METHOD OF TRANSIENT MATHEMATICAL MODEL FOR NON-AUGMENTATION ENGINE

Yu Weifeng and Zhang Shaoji

(Shenyang Aeroengine Research Institute)

ABSTRACT

A simplified method of transient mathematical model for non-augmentation engine is presented, which is used in real-time simulation for developing engine control system. Two spool inertias are considered in the simplified model, which are the main factors for engine transient performance. The combination of engine steady characteristics with transient characteristics is used in the model. The simulation shows: (1) The model has better accuracy and fast operating speed. (2) The model has better flexibility, is easy to use in different engines. (3) The model is convenient for programming in C or FORTRAN language.