

文章编号: 1000-8055(2007)01-0037-04

小子样武器装备可靠性评定过程中 专家信息的规范化描述

刘 琦, 武小悦, 张金槐

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 在对航空航天领域可靠性工程中专家信息的特征进行分析的基础上, 分别对模糊描述、概率描述法、专家打分法、主观语言描述方式的专家信息规范化进行了研究, 并对基于专家信息的验前分布确定过程进行了分析. 建立了专家信息规范化的广义验前信息描述、基于不确定性加权验前信息描述、最大熵法验前信息描述的验前分布确定模型. 论文的研究对于小子样条件下运用 Bayes 方法分析系统可靠性时, 基于专家信息的验前分布确定具有重要的工程指导意义.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 专家信息; 模糊; 验前信息; 规范化

中图分类号: TP114

文献标识码: A

Standardization of description for experts opinion during weapon reliability evaluation under small sampling test

LIU Qi, WU Xiaoyue, ZHANG Jinhui

(College of Information System and Management,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the characteristics analysis of expert's opinion in reliability engineering in aerospace field, the article presents the standardization description for three types of fuzzy description, viz. probability description, expert marking method, and subjective language description method. In addition, the prior distribution foundation on expert's opinion was carried out. In this article, the standardization models of general prior distribution, the weighted method based on expert's uncertainty, and maximum entropy method are presented. It is useful for getting the prior distribution from expert's opinion in reliability engineering when filed test data are small samplings and Bayes method is used.

Key words: aerospace propulsion system; expert's opinion; fuzzy; prior information; standardization

在航空航天领域, 如导弹、卫星、飞船的可靠性试验评估、鉴定过程中, 由于现场试验样本量小, 因此需要运用小子样理论(主要为 Bayes 理论)进行分析, 而运用 Bayes 理论, 关键的问题在于验前信息的获取与验前分布的确定. 在文献[1-3]中指出, 专家信息是验前信息获取的一种主要

途径, Pate-Cornell^[4], Coolen^[5], Singpurwalla & Song^[6], Coolen & Newby^[7] 以及 Lichtenstein & Newman^[8] 针对工程中存在的大量专家经验知识的情况, 分别提出了主观经验知识的收集、整理和合理利用的方案. Bilal^[9] 对实际工程中专家信息的应用进行了详细的讨论, 并给出了专家信息获

收稿日期: 2006-06-05; 修订日期: 2006-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(70571083)

作者简介: 刘琦(1974), 男, 山西运城人, 国防科技大学信息系统与管理学院讲师, 博士, 主要从事装备试验分析与评价的研究.

取的方法.

从现有文献的检索情况看,对可靠性评定中专家经验知识的应用已基本达成一致,但主要集中于对专家经验知识的收集,而对收集后专家经验知识到验前分布的确定的步骤没有明确的说明.这就造成不同的人采用的计算方法不同,从而对专家信息开发的力度不同,所以形成的验前分布不同,使得在运用 Bayes 方法进行可靠性评定时得到的结果不同.因此,急需对专家信息进行规范化描述,使得对专家信息的处理标准化,从而使得利用 Bayes 方法进行可靠性评定时得到一致的评定结果.

1 专家信息的描述方法

从现有文献的检索情况看,专家信息的描述主要有以下几种方法.

1.1 模糊描述

模糊描述是专家信息描述的常用形式,如文献[10]指出:液压泵 2 的模糊可靠度 $\tilde{R}_2 = (0.83, 0.850, 0.902)$,其中 0.850 表示模糊可靠度的均值,0.803 表示模糊可靠度的下限,0.902 表示模糊可靠度的上限,此时隶属度函数为三角函数,0.850 对应的隶属度为 1,而 0.803 与 0.902 对应的隶属度分别为 0,其余在 $[0, 1]$ 之间取值.其隶属度函数如图 1 所示(简称模型 1).

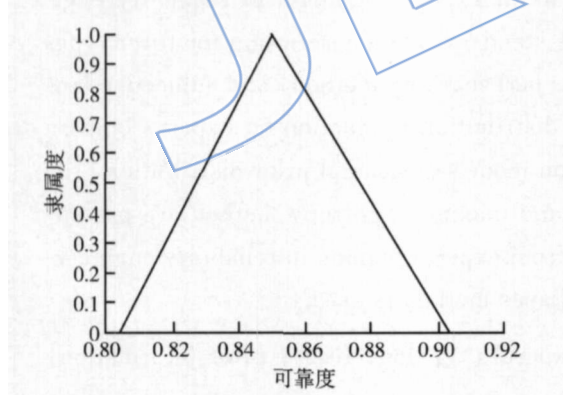


图 1 模型 1 的隶属度函数

Fig. 1 Membership function of model 1

模糊可靠性描述的另一种形式是将可靠性分为不同的评语集合,如文献[11]将航空动力装置任务可靠度的备择集定义为 $V = \{0.95, 0.97, 0.975, 0.98\}$,专家投票后,通过计算得到隶属度函数 $r = [0.1, 0.41, 0.54, 0.225, 0.05]$ (简称模型 2).

在上述模糊可靠性分析的基础上,有些文章

对隶属度函数进行了拓展,如文献[12]描述为:1 号专家认为,就压气机的设计规范来看,压气机可靠度取 0.95 的可能性“很可能是 20%”,取 0.97 的可能性“可能是 75%”,取 0.975 的可能性“可能是 90%”,取 0.98 的可能性“有可能是 100%”.上述描述转化为模糊数学方式为:备择集 $V = \{0.95, 0.97, 0.975, 0.98\}$,专家信息的隶属度为 $\tilde{r} = \{(0.20, 0.04), (0.75, 0.08), (0.90, 0.08), (1.0, 0.15)\}$.此处隶属度函数取三角函数.“很可能是 20%”的隶属度函数如图 2 所示(简称模型 3).

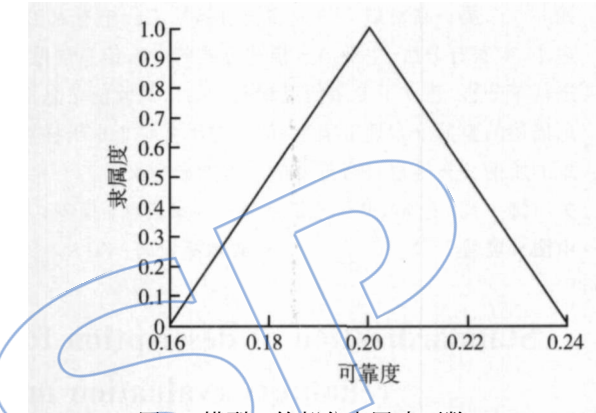


图 2 模型 3 的部分隶属度函数

Fig. 2 Partial membership function of model 3

对于隶属度函数的选择,文献[13]还定义了梯形函数、高斯型函数等隶属度函数.

1.2 概率描述法

文献[14]在对某导弹的可靠性评定中,将专家信息描述为:导弹系统的 MTBF 处于区间 $[a, b]$ 的概率为 c ;或者描述为:导弹系统的可靠度处于区间 $[R_1, R_2]$ 的概率为 p .如导弹任务可靠度处于区间 $[0.8, 1]$ 的概率为 0.7(简称模型 4).

1.3 专家打分法

专家打分法可认为是模糊描述的一种,如文献[11]在获取可靠性的评价因素集后,由专家逐个对评价因素集进行打分,再基于 Vague 值得出个评价因素的隶属度.对于该模型的处理可转化为模型 2 的处理.

1.4 语言描述

在进行系统可靠性,有时获得的专家信息为:该系统的可靠性非常高、该系统的可靠性增长非常快.或者专家的描述为:该系统的可靠性一般.对于这种描述方式在文献[9]中对专家信息的语言描述形式进行了详细的分析.在文中,通过广泛的调查分析,对模糊的语言变量给出相应精确的概率描

述. 由专家口头表示的语言概率向数值的转化如表 1(此表仅为原表的一部分)所示. 此表由 Lichtenstein and Newman (1967) 给出(简称模型 5).

表 1 语言概率及其转换(Lichtenstein and Newman 1967)

Table 1 Language Probability and its conversion (Lichtenstein and Newman 1967)

序号	语言描述	反馈人数	均值	中值	标准差	区间
1	极高	187	0.89	0.90	0.04	0.60~0.99
2	非常高	185	0.87	0.90	0.06	0.60~0.99
3	很高	187	0.87	0.89	0.07	0.60~0.99
4	相当高	188	0.79	0.80	0.10	0.30~0.99
5	较高	187	0.77	0.75	0.13	0.15~0.99

2 专家信息的规范化描述

获取到专家信息后, 运用 Bayes 方法的一个重要步骤就是对专家信息进行规范化描述, 以形成 Bayes 公式所运用的验前分布, 下面对上述几种专家信息的规范化描述方案进行讨论.

2.1 广义验前信息的描述方法

对于模型 1 和模型 2 所示的专家信息, 可借助于 Bayes 方法^[3]中广义验前信息的描述方法将专家信息转换为 Bayes 公式的验前分布.

从模型 1 和模型 2 的描述形式可看出, 专家信息的模糊程度从一定程度上反映出了验前信息的不确定程度. 对模型 1, 专家信息的标准化描述格式为: 某产品的模糊可靠性为 $\tilde{R}(R_1, R_0, R_2)$, 其中 R_0 为模糊可靠度的均值, R_1 和 R_2 分别为模糊可靠度的上下限, 隶属函数为三角函数. 此时借助于 Bayes 方法中广义验前密度的定义, 取产品可靠度的验前密度 $\pi(R)$ 为:

$$\pi(R) = \begin{cases} \frac{R - R_1}{S(R_0 - R_1)} & R_1 \leq R \leq R_0 \\ \frac{R_2 - R}{S(R_2 - R_0)} & R_0 \leq R \leq R_2 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $S = \frac{1}{2}(R_2 - R_1)$

对于模型 2, 专家信息可规范化为可靠度的备择集 $V = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n\}$, 隶属度函数 $r = \{p^1, p^2, \dots, p^i, \dots, p^n\}$. 此时借助于 Bayes 方法中广义验前密度的定义, 取产品可靠度的验前密

度 $\pi(R)$ 为:

$$\pi(R_i) = p_i \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n p_j} \quad (2)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, n$.

2.2 基于不确定性加权的验前信息描述

模型 3 专家信息描述包括 3 部分的内容: (1) 可靠度的备择集 $V = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n\}$; (2) 隶属度函数值 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$; (3) 对隶属度的语言描述, 在此定义为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, 其中语言描述 l_i 反映了专家对所描述的隶属度 p_i 的不确定程度, 以图 2 所示的三角函数为例, 隶属度函数下三角型的面积越大, 或者说, 隶属度函数中隶属度与隶属度的期望值的偏差越大, 则说明专家对所描述的隶属度 p_i 的不确定程度越高, 下面对基于专家信息不确定性加权的验前信息描述方案进行分析.

记专家信息描述中对隶属度 p_i 的不确定程度为 σ_i^2 , 定义如下:

$$\sigma_i^2 = \int_U f(u)(u - E[u])^2 du$$

其中 U 为隶属度的定义域, $f(u)$ 为隶属度函数, $E[u]$ 为隶属度的期望值. 从上述定义可见, σ^2 为概率统计中方差定义的拓展. 对应于图 2:

$$\sigma_i^2 = \int_{0.16, 0.24}^{0.24} f(u)(u - 0.2)^2 du = \int_{0.16, 0.2}^{0.2} \frac{u}{0.04}(u - 0.2)^2 du + \int_{0.2, 0.24}^{0.24} \frac{0.24 - u}{0.04}(u - 0.2)^2 du = 0.1298$$

由于 σ^2 越大, 反映出专家对该判断的不确定程度越大, 因此, 在对专家不确定程度加权时, 可选择以 $1/\sigma_i^2$ 为系数加权. 下面对专家不确定程度加权的过程进行说明.

步骤 1 计算 $1/\sigma_i^2$ ($i = 1, 2, \dots, n$)

步骤 2 计算专家信息的权重:

$$w_i = \frac{1/\sigma_i^2}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j^2}} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

步骤 3 计算可靠度备择集中各元素的验前概率:

$$\pi(R_i) = \frac{w_i u_i}{\sum_{j=1}^n w_j u_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

2.3 最大熵法验前信息的描述

对于模型 4 和模型 5 所述的专家信息, 可以基于最大熵法对专家信息进行规范化描述. 模型

4 的验前信息可表示为在满足约束条件 $\int_a^b f(\theta | \omega) d\theta = k$ 时, 验前分布的确定. 而模型 5 可表示为在满足约束条件:

$\int_a^b \theta f(\theta | \omega) d\theta = k$, $\int_a^b f(\theta | \omega) d\theta = 0.5$, 与 $\int_a^b (\theta - k)^2 f(\theta | \omega) d\theta = \sigma^2$ 时, 验前分布的确定. 式中: θ 为验证指标(可靠度、MTBF 等); ω 为 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_h)$, 其中, $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_h$ 均为 θ 验前分布中的超参数; k 为 θ 在置信区间内的概率; a, b 为 θ 的上、下限; $f(\theta | \omega)$ 为 θ 的概率密度函数.

于是, 问题转化为建立验前分布的熵函数, 并求解其中使得熵函数值取得最大值的超参数 ω , 记为 ω^* , 则 ω^* 为所求验前分布的超参数. 具体描述和解释如下:

$$\begin{cases} H(\omega^*) = \max[H(\omega)] \\ \int_a^b g_i(\theta) f(\theta | \omega) d\theta = c_i \\ (i = 1, \dots, m) \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$H(\omega) = - \int_a^b f(\theta | \omega) \ln f(\theta | \omega) d\theta$$

概率密度函数 $f(\theta | \omega)$ 的熵.

从上述问题的描述中可以看到, 在满足:

$$\int_a^b g_i(\theta) f(\theta | \omega) d\theta = c_i \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

的约束条件下, 使得熵 $H(\omega)$ 为最大值的 ω^* , 即为所求验前分布的超参数. 对于最大熵方法求解验前分布的过程, 在文献[3]中有较为详细的描述, 在此不再赘述.

3 结 论

本文对专家信息的获取与规范化描述及验前分布的确定过程进行了描述, 需要指出的是:

(1) 本文的描述方法仅描述出工程应用中专家信息获取的部分途径, 并不能涵盖专家信息获取的全部途径, 在工程应用中, 可对专家信息获取的途径进行进一步扩展, 以获得更多更有用的专家信息, 为可靠性评估提供高质量的验前信息.

(2) 文中仅对隶属度函数为三角函数的情况进行了说明, 利用文中专家信息的规范化描述方法可进一步对隶属度函数为高斯型函数、梯形函数等函数进行分析.

参考文献:

- [1] Martz H F, Waller R A. Bayesian reliability analysis[M]. John Wiley & Sons, New York: 1982.
- [2] Berger J. Statistical decision theory and bayesian analysis[M]. 2nd edition. New York: Springer Verlag, 1985.
- [3] 张金槐, 唐雪梅. Bayes 方法[M]. 长沙: 国防科大出版社, 1992.
- [4] Pate Cornell M E. Uncertainties in risk analysis: six level of treatment[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1996, 54: 2-3.
- [5] Coolen F P A. On Bayesian reliability analysis with informative priors and censoring[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 53: 91-98.
- [6] Singpurwalla N D, Song M S. Reliability analysis using Weibull lifetime data and expert opinion[J]. IEEE Trans on Reliability, 1988, 37(3): 340-347.
- [7] Coolen F P A, Newby M J. Bayesian reliability analysis with imprecise prior probabilities[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 43: 75-85.
- [8] Lichtenstein S, Newman J R. Empirical scaling of common verbal phrases associated with numerical probabilities[J]. Psychometric Science, 1967, 9(10): 563-564.
- [9] Ayyub B M. A practical guide on conducting expert opinion elicitation of probabilities and consequences for corps facilities[R]. IWR Report 01-R-01, 2001, 1.
- [10] 杨承先, 张琦. 液压系统可靠性模糊设计与评价[J]. 建筑机械, 2003(12): 61-64.
YANG Chengxian, ZHANG Qi. Fuzzy design and assessment to reliability of hydraulic system[J]. Construction Machinery, 2003(12): 61-64.
- [11] 赵德孜, 温卫东. 航空动力装置任务可靠度模糊预计与分配的综合[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(4): 466-470.
ZHAO Dezi, WEN Weidong. Synthetic approach to fuzzy prediction and allocation for aero power plant mission reliability[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(4): 466-470.
- [12] 赵德孜, 温卫东, 段成美. 基于模糊数的航空发动机可靠性预计模型[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 320-325.
ZHAO Dezi, WEN Weidong, DUAN Chengmei. A model of aeroengine reliability prediction based on fuzzy number[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 320-325.
- [13] 王冰泉, 谢维达. 机车故障诊断中征兆隶属度函数的研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2004, 27(6): 9-11.
WANG Bingquan, XIE Weida. Function of membership grade used for fault diagnosis of electric locomotives[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2004, 27(6): 9-11.
- [14] 邢云燕. 小子样条件下武器装备可靠性与维修性指标验证方法[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2005.