

考虑不确定性的无人机安全性评估及决策分析

田毅, 饶浩昌, 肖女娥

(中国民航大学安全科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 定量安全性评估是验证无人机是否满足安全性要求的重要手段。本文首先针对无人机部件失效分布存在参数不确定性的问题, 利用贝叶斯理论对基本事件的失效分布参数进行修正, 得到顶事件的失效概率; 然后借助贝叶斯决策理论完成对顶事件的安全决策分析; 最终将无人机的安全性评估完善为整套的评估-决策分析流程。研究表明: 以某型无人机运行过程中的数据链通信产生的错误信息为例, 能够实现上述顶事件失效概率的计算过程和贝叶斯决策的计算过程。

关键词: 不确定性; 安全性评估; 无人机; 贝叶斯理论; 贝叶斯决策

中图分类号: V328 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2025)01-0083-06

Safety assessment and decision analysis of UAV considering uncertainty

TIAN Yi, RAO Haochang, XIAO Nyu'e

(College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Quantitative safety assessment is an important means to verify whether unmanned aerial vehicle(UAV) meets the safety requirements. Aiming at the parameter uncertainty of UAV component failure distribution, firstly, the failure distribution parameters of basic events are modified by Bayesian theory to obtain the failure probability of top events. Then, the safety decision analysis of top events is completed with the help of Bayesian decision theory. Finally, the safety evaluation of UAV is improved into a complete assessment and decision analysis process. The research shows that the calculation process of top event failure probability and Bayesian decision can be realized by taking the error information generated by data link communication during the operation of a UAV as an example.

Key words: uncertainty; safety assessment; unmanned aerial vehicle (UAV); Bayesian theory; Bayesian decision

当前, 国内外无人机行业蓬勃发展, 无人机系统安全, 即 CCAR-25-R4 第 1309 条^[1]规定的安全性要求, 仍是最关键的问题之一。目前国内外主要参照有人机的适航要求及相关符合性方法来表明无人机系统安全性要求的符合性。有人机主要按照 SAE ARP4761^[2]进行安全性评估, 但是 SAE ARP4761 仅强调保守性, 并没有考虑数据、模型输入和评估过程中存在的不确定性问题。国外有人机至今已有几十年运营经验, 收集了大量运行数据, 形成了完备的运行数据库; 国内有人机也已具备自主运营的能力, 因此, 有人机安全性评估过程存在的不确定性影响较小。而无人机运行经验和数据有限, 具有研制周期短、大量使用货架商品等特点, 导致其安全性评估过程中的不确定性问题

更为突出, 因此, 有必要研究不确定条件下的无人机安全性评估方法。

不确定性分析最早被应用于核电行业, 经过几十年的理论完善与发展, 目前核电行业已将不确定性理论与定量风险分析融合, 并成为在不确定性下开展定量风险分析方面处于领先地位的行业之一^[3-10]。航天、化工等行业也借鉴核电行业, 将不确定性问题纳入定量风险分析, 提出了符合行业自身特点的不确定性处理方法^[11-15]。目前在航空器安全定量风险分析中考虑不确定性问题的研究较少。Cui 等^[16]建立了安全性指标, 提出一种基于不确定性的安全性功能函数, 结合 Bow-tie 模型进行给定严酷度条件下的安全性评估, 并运用概率风险和模糊区间对主客观风险因素进行

不确定性描述,解决了混合不确定条件下主观风险因素量化描述不足的问题^[17],但是该研究是针对民机持续适航的安全性评估。针对无人机的安全性评估方面,Washington等^[18-19]提出用贝叶斯方法处理无人机系统中因运行数据不足导致的失效概率不确定性,还考虑了失效状态严重类别、概率目标等参数中存在的因素,建立贝叶斯网络表达因果关系,更加全面地考虑无人机系统中各参数带来的不确定性影响。该研究虽然以无人机系统作为研究对象,但是考虑的是顶事件的不确定性,并没有通过故障树方法,向下探寻底事件可能存在的不确定性。

本文针对无人机安全性评估过程中存在的数据不确定性进行研究分析。首先分析无人机在进行安全性评估过程中的不确定性来源;然后对认知不确定性中的失效分布参数不确定性进行分析,基于初始厂家提供的可靠性数据,结合无人机试运行期间的事件监测数据,开展考虑认知不确定条件的定量安全性评估,并对评估结果进行决策分析;最终完成考虑不确定性的无人机安全性评估。

1 不确定性来源

在无人机安全性评估过程中,不确定性问题尤为突出,其来源主要如下。

(1)运行经验与数据有限。航空器在运行过程中收集的设备与部件的失效模式、失效率、失效影响等信息是进行安全性评估的重要依据,更是反馈给设计阶段安全性评估的重要输入。由于近年来无人机行业的快速发展,其运行使用受到限制,导致其运行经验和数据极其有限,难以为安全性评估提供数据输入。为此,在无人机安全性评估过程中,设备与部件的失效模式、失效率数据和失效影响等均存在一定的假设,设备与部件的可靠性数据主要来源于分析或工程经验,而非真实的运行数据,这将极大地影响安全性评估的准确性和有效性。

(2)产品研制没有严格遵循符合适航要求的系统研制流程。目前国内无人机研制企业普遍存在适航理念不足,多数无人机型号在研制初期并没有遵循满足适航要求的研制流程,对于系统和复杂电子硬件和软件的研制未严格按SAE ARP4754A^[20]、RTCA DO-254^[21]、RTCA DO-178C^[22]等工业标准文件进行,这将为研制过程中的安全性评估带来极大的不确定性。

(3)大量使用商用货架产品。传统有人机机载设备与部件的设计、制造、试验必须按照相应标准表明其适

航符合性,其研制周期长,安全可靠,但无人机目前商业用途较多,为提高产品竞争力,会大量使用成熟的商用货架产品,研制时并没有严格遵循符合适航要求的设计流程。

2 不确定性建模及决策分析

不确定性可分为随机不确定性与认知不确定性。随机不确定性又称为固有不确定性或不可降低不确定性,对于某个系统来说,有一部分的不确定性是系统本身所具有的,其不能够通过一些手段降低,例如对于某个变量服从一个概率分布,由于每次取值可能存在差异,其结果始终存在不确定性,是概率分布的固有属性。认知不确定性通常是由于人对知识的掌握程度较低所致,理论上说,研究者对某个对象的掌握程度越高,认知不确定性的影响就越小。目前大部分有关不确定性问题的研究都是针对认知不确定性,在安全性定量评估中,通常体现为失效分布参数不确定性,这种不确定性会直接影响评估结果,导致可能出现错误的决策判断。

2.1 不确定性建模

传统的民机安全性评估在工程上一般采用故障树分析方法,当各底事件服从某一特定的概率分布时,经过由下而上的逻辑计算,顶事件的失效规律也服从某一概率分布。由于大多数机载电子产品的失效规律服从指数分布,以指数分布为例,已知每个基本事件*i*先验失效服从的分布,以及通过观测信息得到其服从的分布,故根据贝叶斯公式可得更新后的失效概率分布

$$p(\lambda_i|I, D) = \frac{p(D|I, \lambda_i)p(\lambda_i|I)}{p(D|I)} \quad (1)$$

式中: $p(\lambda_i|I, D)$ 为后验分布; I 为样本总量; D 为观测数据中出现的故障次数; λ_i 为第*i*个基本事件对应的失效率; $p(D|I, \lambda_i)$ 为似然分布; $p(\lambda_i|I)$ 为先验分布; $p(D|I)$ 为观测到似然数据的边缘分布。依据文献[23],先验分布 $p(\lambda_i|I)$ 的确定方法是通过计算参数得出拟定的共轭先验分布或非共轭先验分布,在似然分布 $p(D|I, \lambda_i)$ 服从指数分布等常用分布时,后验分布 $p(\lambda_i|I, D)$ 的计算基于先验分布的形式,如下。

1) 共轭先验分布

此时后验分布一般可通过参数的解析运算直接得出。

假设在未来一段时间内,没有因为该基本事件导致顶事件的失效,则此时应当选择泊松分布作为似然

函数模型。当共轭先验分布形式为 $\text{Gamma}(\alpha_{\text{prior}}, \beta_{\text{prior}})$ 时, 后验分布形式为 $\text{Gamma}(\alpha_{\text{post}}, \beta_{\text{post}})$, 参数间存在解析关系如下

$$\alpha_{\text{post}} = \alpha_{\text{prior}} + C \quad (2)$$

$$\beta_{\text{post}} = \beta_{\text{prior}} + t_{\text{total}} \quad (3)$$

式中: $\alpha_{\text{prior}}, \beta_{\text{prior}}$ 分别为 Gamma 分布作为共轭先验分布时的形状参数和尺度参数; $\alpha_{\text{post}}, \beta_{\text{post}}$ 分别为 Gamma 分布作为后验分布时的形状参数和尺度参数; C 表示基本事件发生的次数; t_{total} 表示观测时间(工时)。在该情况中, $C = 0$ 。

假设未来一段时间内, 观测到 n 个该基本事件的失效时间点, 且第 i 次失效发生的时间点为 t_i , 此时应当选择指数分布作为似然函数模型。当共轭先验分布形式为 $\text{Gamma}(\alpha_{\text{prior}}, \beta_{\text{prior}})$ 时, 后验分布形式为 $\text{Gamma}(\alpha_{\text{post}}, \beta_{\text{post}})$, 参数间存在解析关系如下

$$\alpha_{\text{post}} = \alpha_{\text{prior}} + n \quad (4)$$

$$\beta_{\text{post}} = \beta_{\text{prior}} + \sum_{i=1}^n t_i \quad (5)$$

2) 非共轭先验分布

此时采用马尔科夫链蒙特卡洛(MCMC, Markov chain Monte Carlo)方法中的 MH(Metropolis-Hastings) 算法, 通过构造马尔科夫链进行蒙特卡洛采样, 使其

收敛于某一平稳分布, 该平稳分布即为所求后验分布。具体算法流程如下:

- (1) 给定平稳分布 $\pi(x)$, 概率转移矩阵 $Q(x|x_t)$;
- (2) 从任意概率分布中采样初始值 x_0 ;
- (3) 随机生成服从均匀分布 $U \sim (0, 1)$ 的随机数 u ;
- (4) 从 $Q(x|x_t)$ 中生成样本值 x_s ;
- (5) 当 $u < \min\{\frac{\pi(s)Q(x_s|x_t)}{\pi(t)Q(x_t|x_s)}, 1\}$ 时, 接受状态转移, $x_{t+1} = x_s$, 否则 $x_{t+1} = x_t$;

(6) 重复步骤(3)~(5), 直至循环 N 次结束, 得到样本集 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ 。其中, x_s, x_t 分别为样本集中循环 s 次、 t 次时对应的样本值。

样本集 x 中元素由小到大排序后形成的曲线即为最终模拟出的后验概率分布。

基于上述方法, 在已知各基本事件数据的后验分布和风险时间 T_i 后, 即可计算顶事件概率分布

$$P = \{f(P(\lambda_i|I, D), T_i), i = 1, 2, \dots\} \quad (6)$$

式中, P 为顶事件服从的后验概率分布。

2.2 考虑不确定性的符合性判定过程

无人机的符合性判定过程实质上是一种风险决策分析过程, 如图 1 所示。

图 1 中风险决策分析涉及以下 3 个因素: A 为决

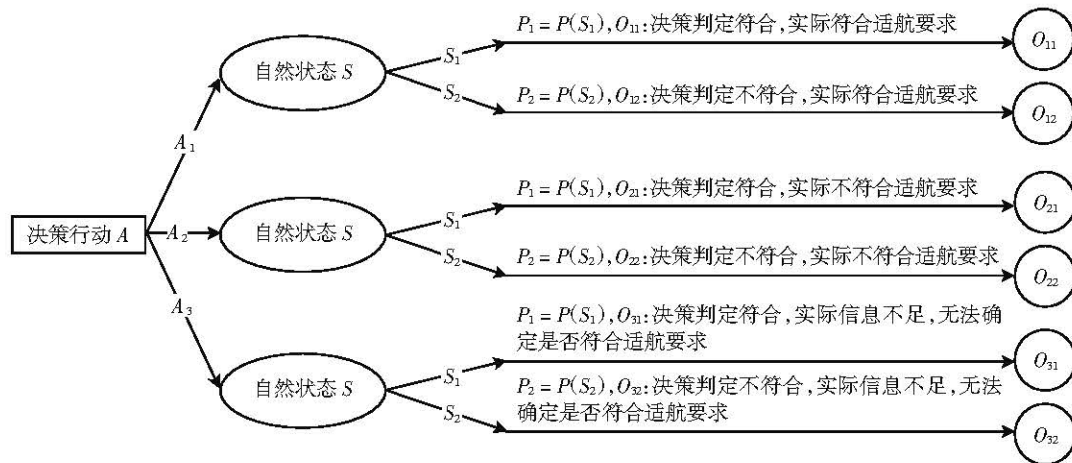


图 1 风险决策分析过程

Fig.1 Risk decision analysis process

策行动, $A = \{A_1, A_2, A_3\}$, 其中: A_1 为接受, A_2 为不接受, A_3 为信息不足, 无法判断; S 为自然状态, $S = \{S_1, S_2\}$, 其中: S_1 为评估对象实际符合, S_2 为评估对象实际不符合; O 为决策结果, $O = \{O_{11}, O_{12}, O_{21}, O_{22}, O_{31}, O_{32}\}$ 。容易得出关于决策结果 O 的决策表, 如表 1 所示。

对于每个决策行动, 确定其损失有助于分析决策风险。用 L_{ij} 表示决策行动为 $A_i (i = 1, 2, 3)$, 自然状态为 $S_j (j = 1, 2)$ 时的损失值。当 L_{ij} 为负数时, 代表决策

表 1 决策表

Tab.1 Decision table

决策行动	S_1	S_2
A_1	O_{11} 决策判定符合, 实际符合适航要求	O_{12} 决策判定不符合, 实际符合适航要求
A_2	O_{21} 决策判定符合, 实际不符合适航要求	O_{22} 决策判定不符合, 实际不符合适航要求
A_3	O_{31} 决策判定符合, 实际信息不足, 无法确定是否符合适航要求	O_{32} 决策判定不符合, 实际信息不足, 无法确定是否符合适航要求

的选取对无人机的安全有正面影响,反之,则有负面影响。 L_{ij} 的确定方式如表 2 所示。

表 2 损失值及其含义

Tab.2 Loss value and its meaning

损失值	含义
L_{11}	取负整数,损失值最小,是最理想的情况之一
L_{12}	取正整数,损失值最大,是最不理想的情况
L_{21}	取正整数,由于该情况下,将适航状态判定为不符合适航要求,可能导致设计成本和符合性判定成本增加,但对安全性影响较小,相对 L_{12} 更理想,故 $L_{21} < L_{12}$
L_{22}	取负整数,损失值最小,是最理想的情况之一
L_{31}	取正整数, $L_{31} < L_{21}$
L_{32}	取正整数, $L_{32} < L_{21}$

$P(S_j)$ 为符合自然状态 S_j 的概率,在采集的大量样本中,处于自然状态 S_j 的样本占总样本量的比值即为此时的 $P(S_j)$,依据 L_{ij} 和 $P(S_j)$ 的综合评估结果决定采取何种决策行动。以损失期望值 E 衡量评估结果,每种决策行动的损失期望值记为 $E(A_i)$,则有

$$\begin{cases} E(A_1) = L_{11}P(S_1) + L_{12}P(S_2) \\ E(A_2) = L_{21}P(S_1) + L_{22}P(S_2) \\ E(A_3) = L_{31}P(S_1) + L_{32}P(S_2) \end{cases} \quad (7)$$

显然, $P(S_1) = 1 - P(S_2)$ 。根据基于最小风险的贝叶斯决策准则,最小的损失期望值对应最佳的决策行动,则有

$$A_{\text{best}} = \arg \min_A \{E(A_i)\} \quad (8)$$

通过式(8)确定的决策行动 A_{best} 代表符合性判定的目标决策选择,是从安全角度出发,考虑对无人机安全状态的误判与否制定的最佳决策,并不涉及评估成本、维修成本等费用因素。

3 案例分析

某型无人机为取得设计生产批准函,共运行试飞了 3 000 工时,并在该时间段内对“数据链通信失效”的失效状态进行观测。假定该无人机的平均风险时间 $T = 2 \text{ h}$ 。针对“数据链通信失效”的失效状态构建故障树如图 2 所示,观测到的似然信息如表 3 所示。分别在共轭先验与非共轭先验下进行不确定性的定量安全性评估。

3.1 确定似然函数

在该案例中,对于已知失效次数为 0 和工作时间

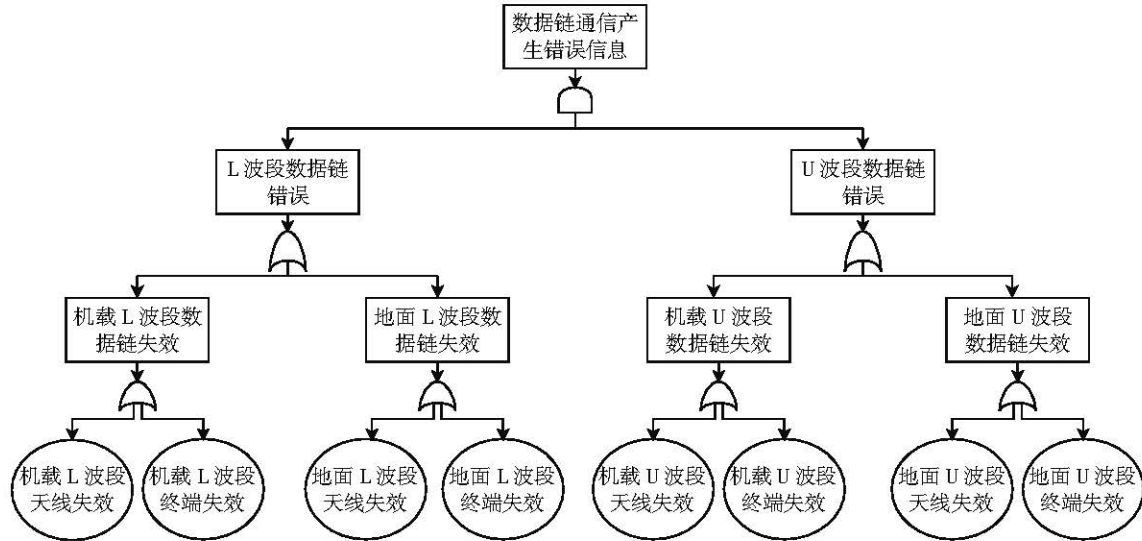


图 2 数据链通信产生错误信息故障树

Fig.2 Fault tree of error information generated in data link communication

为 t (单位:工时)的基本事件,似然函数模型应选择泊松分布,如下

$$p_1(D|I, \lambda_i) = \frac{(\lambda_i t)^D}{D!} e^{-\lambda_i t} \quad (9)$$

对于已知失效次数和发生失效时对应时间点的基本事件,似然函数模型应选择指数分布如下

$$p_2(D|I, \lambda_i) = \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad (10)$$

式中, $p_1(D|I, \lambda_i)$ 和 $p_2(D|I, \lambda_i)$ 为似然分布。

3.2 确定基本事件失效的先验分布

1) 共轭先验

由于指数分布的共轭先验分布为 Gamma 分布,依据文献[23],选择形状参数 $\alpha = 1$,尺度参数 $\beta = 1/\lambda_i$ 的 Gamma 分布作为各基本事件的先验分布,如下

$$f(\lambda_i|I) \propto \frac{\beta^\alpha \lambda_i^{\alpha-1} e^{-\lambda_i \beta}}{\Gamma(\alpha)} \quad \lambda_i > 0 \quad (11)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (12)$$

表 3 似然信息与获取的先验失效率数据

Tab.3 Likelihood information and acquired prior failure rate data

基本事件	失效率/ (10 ⁻⁴ h ⁻¹)	运行 3 000 工时内故障数 D/次 (故障时间点/h)
机载 L 波段天线失效	1.30	0
机载 L 波段终端失效	9.00	1(1 500)
地面 L 波段天线失效	3.00	0
地面 L 波段终端失效	10.00	1(1 200)
机载 U 波段天线失效	0.12	0
机载 U 波段终端失效	0.80	0
地面 U 波段天线失效	0.13	0
地面 U 波段终端失效	0.97	0

式中,Γ(α)为 Gamma 函数。

2)非共轭先验

此时选择常用的对数正态分布作为底事件的非共轭先验分布。对数正态分布的概率密度函数如下

$$f(\lambda_i|I) = \frac{1}{\lambda_i \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln \lambda_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \lambda_i > 0 \quad (13)$$

式中:μ 和 σ 分别为变量对数的均值和标准差。依据文献[15],各底事件对数正态(Lognormal)分布表达式如表 4 所示。

表 4 事件及所服从的非共轭先验分布

Tab.4 Events and their non-conjugate prior distributions

事件名称	非共轭先验分布
机载 L 波段天线失效	Lognormal(-9.171 0, 0.445 96)
机载 L 波段终端失效	Lognormal(-7.236 1, 0.445 96)
地面 L 波段天线失效	Lognormal(-8.334 7, 0.445 96)
地面 L 波段终端失效	Lognormal(-7.130 8, 0.445 96)
机载 U 波段天线失效	Lognormal(-11.809 2, 0.952 72)
机载 U 波段终端失效	Lognormal(-9.656 5, 0.445 96)
地面 U 波段天线失效	Lognormal(-11.729 2, 0.952 72)
地面 U 波段终端失效	Lognormal(-9.463 8, 0.667 85)

3.3 计算基本事件失效率的后验分布

1)共轭先验情况

由式(2)—式(5)可直接解析算出后验失效率分布,表达式如下

$$f(\lambda_i|D, I) \propto \frac{(\beta + t_i)^{(\alpha+D)} \lambda_i^{(\alpha+D-1)} e^{-\lambda_i(\beta+t_i)}}{\Gamma(\alpha + D)} \quad \lambda_i > 0 \quad (14)$$

式中,D 为 3 000 工时内观测到故障的次数。根据式(14)可得各基本事件失效率后验分布如表 5 所示。

2)非共轭先验情况

此时无法解析计算后验参数,借助 StataMP16.0,建立基于 MH 算法的贝叶斯模型,经过本文 2.1 节 MH 算法流程对失效率进行后验计算。

3.4 计算顶事件失效概率分布

针对两种情况下的分析结果,在风险时间 T = 2 h

表 5 事件及所服从的共轭先验修正下的后验分布

Tab.5 Events and their posterior distribution under a conjugate prior correction

事件名称	共轭先验下后验分布
机载 L 波段天线失效	Gamma(1, 10 692.308)
机载 L 波段终端失效	Gamma(2, 3 111.111)
地面 L 波段天线失效	Gamma(1, 6 333.333)
地面 L 波段终端失效	Gamma(2, 2 200)
机载 U 波段天线失效	Gamma(1, 86 333.333)
机载 U 波段终端失效	Gamma(1, 15 500)
地面 U 波段天线失效	Gamma(1, 79 923.077)
地面 U 波段终端失效	Gamma(1, 13 309.278)

时,分别计算出基本事件失效服从的后验分布,按照故障树门的逻辑与和逻辑或向上推理,得出两种情况下考虑不确定性后的顶事件失效概率分布。同时,为了增加研究对比项,在不对数据做任何修正时,对已有失效率数据进行推理,得出未修正条件下顶事件的失效概率分布。3 种情况下的顶事件失效概率分布如图 3 所示。

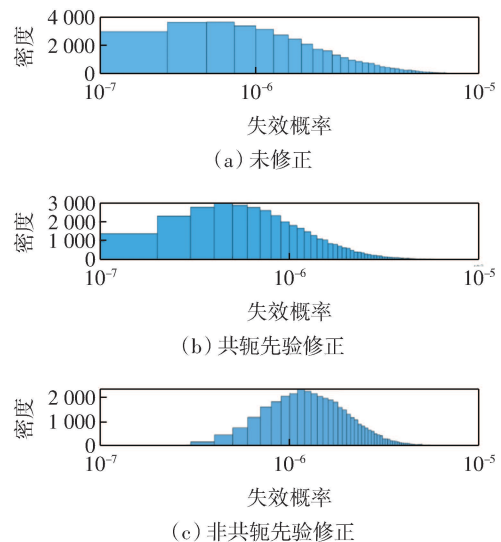


图 3 3 种情况下顶事件失效概率密度图

Fig.3 Probability density diagram of top event failure in three cases

3.5 不确定性下的符合性判定过程

对 3 种情况下的顶事件失效概率进行非参数化拟合,得到其核函数分布。根据安全性要求,数据链通信产生错误信息对应的定量安全性目标为 1.0 × 10⁻⁶/FH,由于风险时间 T = 2 h,故每次飞行对应的失效概率为 2.0 × 10⁻⁶,针对发生定量概率目标小于 2.0 × 10⁻⁶的失效状态,3 种情况下顶事件失效概率核函数分布如图 4 所示。由图 4 中可以看出,未修正数据的情况下,顶事件的失效概率分布最宽,数据分布最为分散,修正后的数据分布较为集中。

借助 Matlab 对 3 种情况下后验概率集进行筛选,

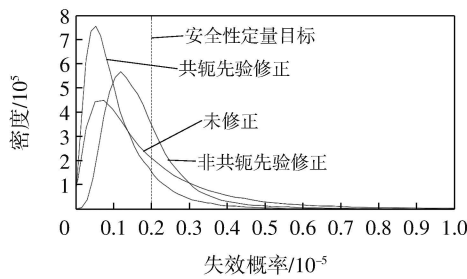


图4 3种情况下顶事件失效概率核函数分布图与安全性定量目标

Fig.4 Kernel function distribution diagram of top event failure probability and safety quantitative objective in three cases

分别得出符合安全性目标的概率,结合决策表完成符合性判定过程。得出的贝叶斯决策概率和定义的决策损失值分别如表6和表7所示。

表6 贝叶斯决策概率

Tab.6 Bayesian decision probability

决策概率	未修正	共轭先验	非共轭先验
$P(S_1)$	0.671 5	0.874 2	0.697 4
$P(S_2)$	0.328 5	0.125 8	0.302 6

表7 某一自然状态和决策行动下对应的损失值

Tab.7 Loss value corresponding to a natural state and decision action

决策行动	S_1	S_2
A_1	$L_{11} = -3$	$L_{12} = 3$
A_2	$L_{21} = 1$	$L_{22} = -3$
A_3	$L_{31} = 2$	$L_{32} = 2$

对两种情况下的贝叶斯决策风险进行计算,得出决策行动对应的损失期望 $E(A_i)$ 如表8所示。

表8 贝叶斯决策风险

Tab.8 Bayesian decision risk

损失期望	未修正	共轭先验	非共轭先验
$E(A_1)$	-1.028 7	-2.244 9	-1.184 1
$E(A_2)$	0.014 3	0.622 4	0.092 1
$E(A_3)$	2.000 0	2.000 0	2.000 0

从表8中可以看出,3种情况下采取决策行动 A_1 时,其损失期望分别为-1.028 7、-2.244 9和-1.184 1,在各自决策行动中对应最小的损失期望,依据基于最小风险的贝叶斯准则,此时的“数据链通信失效”满足安全性要求,故无人机处于适航状态,无须采取进一步纠正措施。

4 结语

对某型无人机的风险开展安全性评估及决策分析,具体评估工作如下。

(1)提出一种针对故障树中底事件的认知不确定性数据修正方法,以底事件的初始失效数据作为先验信息,并观测一段时间内无人机的运行数据作为似然信息,利用MH算法对基本事件进行后验仿真,通过后验信息计算考虑不确定性后的顶事件失效概率。

(2)将贝叶斯决策理论用于对无人机的符合性验证,对各安全决策的贝叶斯风险进行定量计算,对无人机的适航状态进行决策判断,以损失期望最小为判定原则,选择最优安全决策方案。

本文同样存在一定局限性,无人机安全性评估存在失效严重程度、安全性定量目标等多方面的不确定性,仅考虑失效率不确定性的安全性评估不能满足无人机安全性评估的所有情况,未来会考虑多种因素的不确定性影响,进一步研究不确定条件下无人机的安全性评估的问题。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局, 2011.
- [2] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment: ARP4761[S]. New York: SAE International, 1996.
- [3] 郭家丰, 卢川, 毛辉辉, 等. 新型不确定性分析容忍限估计方法[J]. 核动力工程, 2020, 41(6): 131-137.
- [4] 邓云李. 核电厂在线风险监测中的不确定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [5] 崔威杰, 曹博, 陈义学. 基于贝叶斯MCMC方法的高斯烟羽模型不确定性分析[J]. 核技术, 2020, 43(4): 51-57.
- [6] 殷煜皓, 林支康, 梁国兴, 等. 核电厂大破口事故建模与初始参数不确定性分析[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2012, 15(1): 42-46.
- [7] 李禾, 马静娴. 不确定性分析在概率安全评价中的应用[J]. 核动力工程, 2002, 23(4): 71-74.
- [8] 耿学勇, 刘哲. 考虑地震动参数不确定性的边坡可靠度分析方法探索[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(13): 80-82.
- [9] 郑玉涛. 风险告知的PCT安全裕度量中认知不确定性处理方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [10] 王洋洋. 核电厂典型事故分析不确定性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [11] 高辰. 分布式卫星系统概念设计中的不确定性参数分析方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.
- [12] 姜定国. 面向不确定条件下的高超声速飞行器的控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [13] 李玉庆, 徐敏强, 王日新. 航天器观测重调度问题中的模糊性不确定因素及其处理[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1106-1111.
- [14] 张欢, 王洪超, 郭浩. 数字温度指示调节仪测量结果的不确定度分析与评定[J]. 品牌与标准化, 2018(6): 51-54.