

## 混合不确定条件下航空不安全事件量化分析方法\*

崔利杰, 陈浩然, 任 博, 张贾奎

(空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 陕西 西安 710051)

**摘要:**为解决不确定条件下航空不安全事件量化分析的难题,基于随机和模糊理论对影响飞行安全的主客观变量进行了混合不确定描述,将难以用概率表示的主观变量处理成为隶属度 $\lambda$ 水平截集上服从均匀分布的随机变量。在此基础上,提出了混合不确定条件下航空安全指标和数值计算方法,所提指标和方法能够简洁、直观、准确地反映航空安全水平。通过航空安全领域普遍采用的Bow-tie模型对轮胎爆破事件安全性指标和隶属度关系进行仿真分析。结果表明:将不确定变量控制在一定隶属度水平,能显著提高航空安全指标。

**关键词:**航空安全;混合不确定性;Bow-tie模型;量化分析;模糊变量

中图分类号:V328 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2020)02-092-06

## Quantitative analysis method of aviation unsafe events under mixed uncertain conditions

CUI Lijie, CHEN Haoran, REN Bo, ZHANG Jiakui

(Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of quantitative analysis of aviation unsafe events under uncertain conditions, based on the random and fuzzy theory, a mixed uncertain description of the subjective and objective variables that affect flight safety was proposed. To describe the subjective variables which were hard to be expressed by probability, the random variables that follow a uniform distribution in the  $\lambda$ -cut set of membership were introduced. Then, an aviation safety index and a numerical computational method under mixed uncertain conditions were proposed, which can reflect the aviation safety level concisely, intuitively and accurately. Through the Bow-tie model which is commonly used in the field of aviation safety, the relationship of the safety index and the membership of tire burst accident was obtained by simulation analysis. The quantitative results show that the aviation safety indices can be significantly improved with proper control of the membership degree.

**Keywords:** aviation safety; mixed uncertainty; Bow-tie model; quantitative analysis; fuzzy variable

安全是航空业发展永恒的主题,但航空事故始终伴随着人类航空事业发展历程。由于现代航空器是一个多组件的复杂系统,事故发生涉及因素多、范围广、来源杂,特别是人为因素主观特征显著,为航空领域量化分析带来新的困难。如何运用合适的量化描述方法、构建科学的描述模型,对不确定条件下航空不安全事件量化评估具有重要意义。

迄今为止,国内外学者针对航空不安全事件量化评估工作开展了大量研究,并取得了有效的成果。国外最早提出飞行风险定量评估方法,并在航天领域<sup>[1]</sup>得到了极大的拓展和应用。国际民航组织<sup>[2]</sup>提出安全风险管控要求,采用风险矩阵评估方法将危险事件控制在可接受水平;欧洲

航天局<sup>[3]</sup>制定了风险评估标准,确定了实施风险评估的目标;在21世纪,考虑到风险评估中不确定因素的影响,基于威布尔分布、泊松分布等风险评估技术得到进一步拓展<sup>[4-5]</sup>。国内的相关研究虽然起步较晚,但也在飞行安全、航空技术等风险评估领域进行了相关研究<sup>[6]</sup>。徐庆宏等<sup>[7]</sup>使用蒙特卡洛方法模拟航空发动机多故障发生的情况,计算故障模式的风险因子并开展风险预测;郭媛媛等<sup>[8]</sup>建立了航空部件风险仿真模型,评估航空飞行风险等级;韦艺等<sup>[9]</sup>将概率风险结合层次分析,获得每种风险的严酷程度;郭媛媛等<sup>[10]</sup>采用蒙特卡洛方法模拟单机和机队飞行的故障时间,给出持续性适航的风险水平。这些研究在开展量化分析时,多是利用传统概率理论描述航空领

\* 收稿日期:2018-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71401174,71701210)

作者简介:崔利杰(1979—),男,河南许昌人,副教授,博士,E-mail:lijie\_cui@163.com

域的随机因素。然而航空活动还包含大量由于缺乏知识和信息导致的主观不确定因素,尤其是与人为活动相关的环节,主观特征更为明显。针对主观不确定变量,国内外学者提出采用模糊理论<sup>[11]</sup>、贝叶斯概率<sup>[12]</sup>等方法进行量化描述,这都为本文研究提供了参考。

本文综合随机理论和模糊理论,系统考虑航空不安全事件发生的混合不确定性,按照数学建模、指标引用、变量描述、定量分析等步骤,研究基于 Bow-tie 模型的航空不安全事件量化分析方法,并结合实例验证该方法的合理性、有效性,为航空不安全事件量化分析提供一种新思路。

### 1 典型航空不安全事件建模

航空不安全事件量化分析的前提,是需要构建一个能够充分描述事件发生的定性或定量模型。Bow-tie 模型充分结合传统安全分析工具故障树和事件树的优点,将事故的发生原因、防范措施、可能导致的后果及相应控制措施等诸多因素综合起来,近年来在各领域得到充分应用。

#### 1.1 Bow-tie 模型构建

Bow-tie 模型共包含左侧的故障树(Fault Tree Analysis, FTA)和右侧的事件树(Event Tree Analysis, ETA),构建过程遵循以下五条原则:①顶事件是故障树的最终事件,是事件树的初始事件;②只有一个顶事件,连接故障树和事件树;③危险源位于模型左边,也称为导致事故发生的基本事件;④后果事件位于模型最右边;⑤故障树的分支均向顶事件汇合,事件树由顶事件向后拓展直至出现所有后果事件。其原理如图 1 所示。

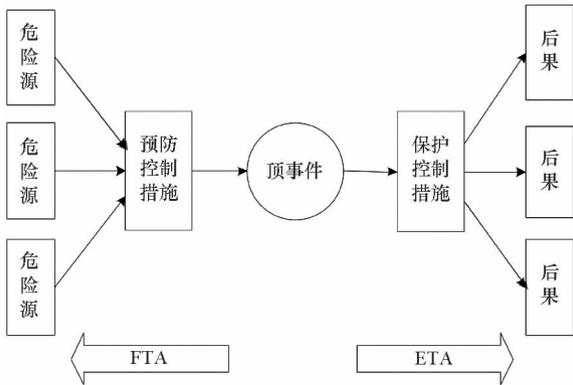


图 1 Bow-tie 模型原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the Bow-tie model

Bow-tie 模型打通了基本事件和后果事件的关系,解决了传统事故分析模型量化不足、条块分割严重、直观性和针对性不强的问题,构成了一幅

展示事故发生前因后果的可视化领结图。

#### 1.2 Bow-tie 模型定量分析

确定 Bow-tie 模型中涉及各变量的数值后,可以根据逻辑关系开展定量分析。以图 2 所示的典型 Bow-tie 模型为例,该模型中一共包含五类事件:基本事件 BE、中间事件 IE、顶事件 CE、控制事件 SE 和后果事件 OE。

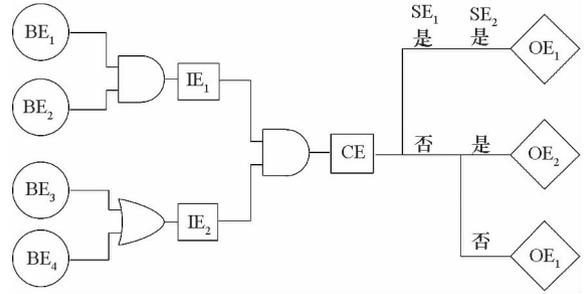


图 2 典型 Bow-tie 模型示意图

Fig. 2 Sketch map of the typical Bow-tie model

假设基本事件之间相互独立,已知每个基本事件发生的概率为  $p^{BE}$ ,则通过逻辑关系得到中间事件和后果事件发生概率  $p^{IE}$ 、 $p^{OE}$ 。若要计算后果事件发生概率,考虑到存在  $l$  个分支能够导致第  $i$  个后果事件  $OE_i$  发生的可能性,假设第  $m$  ( $m < l$ ) 个分支上  $k$  个控制事件发生概率为  $p_j^{SE}$ ,则第  $m$  个分支的后果事件的发生概率为

$$p_i^{OE} = \sum_{m=1}^l p^{CE} \prod_{j=1}^m f(p_j^{SE}) \quad (1)$$

式中,当某一分支上环节事件发生时,  $f(p_j^{SE}) = p_j^{SE}$ ;当环节事件不发生时,  $f(p_j^{SE}) = 1 - p_j^{SE}$ 。因此,后果事件  $OE_i$  的发生概率可表示为  $n$  个基本事件发生概率与  $m$  个后果事件发生概率的函数,即

$$p_i^{OE} = f(p_1^{BE}, p_2^{BE}, \dots, p_n^{BE}, p_1^{SE}, p_2^{SE}, \dots, p_m^{SE}) = f(p^{BE}, p^{SE}) \quad (2)$$

### 2 不确定性描述

以往学者开展航空不安全事件量化分析的过程中,对大量风险因素进行了不确定性描述。总结 Bow-tie 模型涉及的因素特征,可将因素变量类型分为基本事件和控制事件两大类,并根据两类事件不确定性来源及特点提出不同的描述方法。

#### 2.1 基本事件变量描述

基本事件涉及大量的产品失效问题,可根据当前数据库对故障信息的收集统计,采用基于概率的方法计算得到相关基本事件的发生概率。

以机械结构类产品为例,其故障率多数服

从对数正态分布,则可先统计得到产品的平均故障时间  $MTBF$  及其方差  $VAR$ ,然后根据相应公式求解得到其概率密度函数的分布参数的均值  $\mu = \lg (MTBF^2 / \sqrt{VAR + MTBF^2})$ 、方差  $\sigma = \sqrt{\lg(VAR / MTBF^2 + 1)}$ ,最后得到飞行时间  $T$  下机械件的故障时间概率密度函数为

$$f(T|\mu, \sigma) = \frac{1}{T\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln T - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

而多数电子类产品的  $MTBF$  一般服从指数分布,假定故障率为  $\lambda$ ,则分布参数  $\mu_{MTBF} = 1/\lambda$ ,因此飞行时间为  $T$  时的概率密度函数为

$$f(T|\lambda) = \begin{cases} \frac{1}{\mu} e^{-\frac{T}{\mu}} & T > 0, \lambda > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

由于统计过程人员的能力、工作方法及统计的数量和范围有限,因此统计得到的数值呈现一定的不确定性。如统计得到的产品  $MTBF$ ,可假定其服从分布参数为  $(\mu_{MTBF}, \sigma_{MTBF}^2)$  的正态分布。

### 2.2 控制事件概率描述

控制事件大多涉及人机交互、组织管理等影响,具有一定主观不确定性,信息数据难以完全准确收集,本文中利用模糊理论对其进行描述。

确定隶属度函数是使用模糊理论开展变量描述的核心,而模糊分布函数适合信息数据难以收集的情况。以三角隶属度模糊分布函数为例,在置信度  $\lambda$  下,控制事件发生概率在三角隶属度函数下的水平截集如图 3 所示。水平截集即为控制事件发生概率在三角隶属关系置信度  $\lambda$  下的取值范围,  $p_i^{SE}$  为取值下限,  $\bar{p}_i^{SE}$  为取值上限。

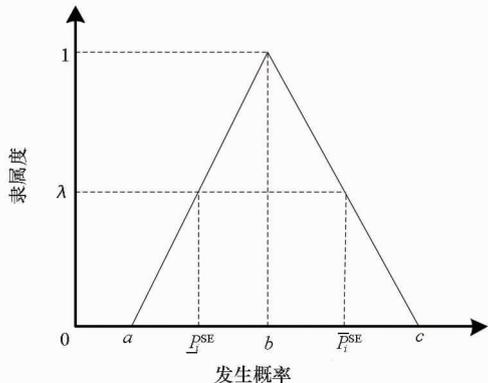


图 3 三角隶属度函数水平截集

Fig. 3 Level set of trigonometric membership function

由于航空活动的复杂性,所包含的客观不确定变量和主观不确定变量共同构成了混合不确定条件下的风险因素,对主客观变量的准确描述有

利于提高量化分析结果准确性和可信度。

### 3 不安全事件定量分析

通过概率方法和模糊理论对混合变量进行描述之后,可构建航空安全指标,进一步得到相应的后果事件的发生概率,开展量化分析工作。

#### 3.1 航空安全指标

传统的航空安全风险是一个包含风险矩阵和事故发生可能性的复合性指标,不利于开展量化评估工作。因此,Cui 等<sup>[13]</sup>提出了一种新的航空安全性指标,即航空器在预期环境下,执行预定任务时导致危险后果的可能性低于人们预期值的概率,即

$$R_{|s} = P\{P_{|s} < [P_{|s}]\} = P\{P_{|s} - [P_{|s}] < 0\} \quad (5)$$

式中: $R_{|s}$ 为给定严酷度后果的航空安全性指标, $P$ 表示各类事件发生概率, $|s$ 为给定严酷度的不安全事件后果, $P_{|s}$ 为给定严酷度的后果事件发生概率, $[P_{|s}]$ 为给定严酷度不安全事件发生概率阈值。

根据式(2),以及 MIL-STD - 882 等标准规定的一系列航空事故后果严酷度阈值,在给定严酷度情况下的航空安全性功能函数可以构建为

$$\begin{aligned} g(p^{BE}, p^{SE}) &= P_{|s} - [P_{|s}] \\ &= f\{p^{BE}, p^{SE}\} - [P_{|s}] \\ &= f\{p_1^{BE}, p_2^{BE}, \dots, p_m^{BE}, \\ &\quad p_1^{SE}, p_2^{SE}, \dots, p_n^{SE}\} - [P_{|s}] \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $p^{BE} = \{p_1^{BE}, p_2^{BE}, \dots, p_m^{BE}\}$ 为  $m$  维独立随机变量, $p^{SE} = \{p_1^{SE}, p_2^{SE}, \dots, p_n^{SE}\}$ 为  $n$  维模糊不确定变量。记随机变量  $p_i^{BE} (i = 1, 2, \dots, m)$  的概率密度函数为  $f_{p_i^{BE}}(p_i^{BE})$ ,模糊变量  $p_i^{SE} (i = 1, 2, \dots, n)$  的隶属函数为  $\mu_{p_i^{SE}}(p_i^{SE})$ ,则可计算得到给定严酷度情况下航空安全性指标为

$$\begin{aligned} R_{|s}(\lambda) &= g(p^{BE}, p^{SE}(\lambda)) < 0 \\ &= \iint_{g(p^{BE}, p^{SE}(\lambda)) < 0} f_{p^{BE}}(p^{BE}) \cdot \\ &\quad f_{p^{SE}(\lambda)}(p^{SE}(\lambda)) dp^{BE} dp^{SE}(\lambda) \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $f_{p^{BE}}(p^{BE})$  为基本事件随机变量  $p^{BE}$  服从相应客观不确定函数分布的联合概率密度,  $f_{p^{SE}(\lambda)}(p^{SE}(\lambda))$  为控制事件模糊变量  $p^{SE}$  在水平截集内服从一定分布的联合概率密度函数。

相较于传统风险矩阵指标在事故后果多且非连续情况下航空安全评估的困难,新的安全指标用一个具体的数值清晰直观地展示了航空安全态势,为后续的量化分析带来了便利。

### 3.2 量化分析流程

由于式(7)为一个多维数及隐式积分问题,显然数值算法不能得到其解析解,因此本文选取 Monte-Carlo 数值仿真方法开展航空量化分析。

给定隶属度  $\lambda$ , 根据三角隶属度函数计算得到控制变量  $p_i^{SE} \in [p_i^{SE}(\lambda), \bar{p}_i^{SE}(\lambda)]$ , 再由式(1)求得后果事件发生概率值域  $[p^{OE}(\lambda), \bar{p}^{OE}(\lambda)]$ 。

由于模型中部分控制事件发生率被描述为模糊变量,即隶属度  $\lambda$  下控制变量的发生概率  $p^{SE}(\lambda)[p_i^{SE}, \bar{p}_i^{SE}]$ , 故所求航空安全性指标也必然为一模糊值。考虑到后果事件发生相互独立,因此采用 Monte-Carlo 方法求解一定隶属度下安全性指标的计算公式为

$$\begin{aligned}
 R_{|s}(\lambda) &= \prod_{k=1}^l \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_S^{(k)}(v_j^{OE}(\lambda)) \right] \\
 &= \prod_{k=1}^l \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_S^{(k)}(g(p_j^{BE}, p_j^{SE})) \right] \\
 &= \prod_{k=1}^l \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_S^{(k)}(P_{|s} - [P_{|s}]) \right] \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中:  $I_S^{(k)}(v_j^{OE}(\lambda))$  为第  $k$  个后果事件严酷度  $v_j^{OE}(\lambda)$  所对应安全域  $S^{(k)}$  的指示函数,其取值为  $I_S^{(k)}(v_j^{OE}(\lambda)) = \begin{cases} 1, v_j^{OE}(\lambda) \in S \\ 0, v_j^{OE}(\lambda) \notin S \end{cases}$ ;  $N, l$  分别为仿真次数和后果事件个数。

由于模糊变量的传递性,在一定隶属度  $\lambda$  下对控制事件大量随机抽样,求得安全性指标  $R$  必然服从区间  $[R_{|s}(\lambda), \bar{R}_{|s}(\lambda)]$  的概率分布。因此,混合变量下 Monte-Carlo 仿真流程如图 4 所示。

由仿真流程不难发现,由于航空组件故障失效多是与时间  $T$  相关的,同时考虑到隶属度  $\lambda$  对控制事件概率区间的影响,因此求解的航空安全指标随着时间  $T$  和隶属度  $\lambda$  动态变化。

### 4 典型案例验证

轮胎作为航空器起落系统的重要组成部分,其意外爆破往往造成重大的财产损失、人员伤亡。根据飞机轮胎爆破事故统计结果,其危险源包括人员因素、机械因素、环境因素等。本文以文献[13]中构建轮胎爆破事故的 Bow-tie 模型为例,验证文中所提方法的准确性和可行性。

该模型中,顶事件轮胎爆破连接 16 个基本事件,事故发生可能导致 4 种结果事件。顶事件发生后有 4 类控制事件分别定义为:  $SE_1$ , 启动应急

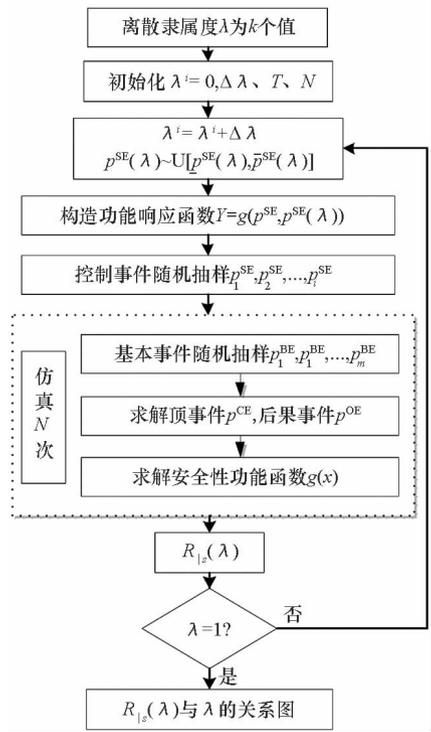


图4 混合变量下 Monte-Carlo 方法安全性指标仿真流程  
Fig.4 Flowchart of computing the aviation safety index by the Monte-Carlo method with mixed variables

刹车系统;  $SE_2$ , 避让飞机、建筑物;  $SE_3$ , 增设隔离网;  $SE_4$ , 启动应急消防措施。基本事件统计数据的不确定性描述情况如表 1 所示, 不同隶属度下控制事件按照三角隶属函数模糊区间分布的不确定性描述如表 2 所示。

若根据航空领域对风险事件通用界定方法, 将模型中 4 种后果的严酷程度分别定义为灾难、危险、较大和轻微, 其可接受概率阈值分别是  $10^{-9}$ 、 $10^{-7}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-3}$ 。利用上述统计数据、安全指标和求解方法, 计算得到一定隶属度下航空安全指标随时间的变化如图 5 所示。

图 5 表明, 在隶属度  $\lambda$  确定的情况下, 轮胎爆破事件的航空安全指标总趋势随飞行时间增加而减小。特别是飞行时间为 500 ~ 600 h 时, 航空安全指标发生突变, 安全度急剧下降, 原因为此时大量基本事件失效所产生的累积效应, 因此需要特别注意该时间段基本事件失效导致事故发生的可能性, 尤其是机务保障人员应重点关注相应基本事件在该时间段的发生的可能性。为进一步说明隶属度  $\lambda$  对航空安全指标  $R$  的影响, 在安全水平突变的 500 ~ 600 h 飞行时间区间分别选取飞行时间分别为 530 h、555 h、580 h 的三个时刻, 仿真得到各个飞行时间下航空安全指标  $R$  随隶属度  $\lambda$  变化的曲线, 如图 6 所示。

表 1 轮胎爆破 FTA 基本事件发生概率及分布参数

Tab. 1 Description and parameters of basic events of tire burst accident

编号	基本事件	故障时间		统计量		
		分布类型	分布参数	MTBF	分布类型	变异系数
BE <sub>1</sub>	轮毂裂纹	对数正态分布	$\mu, \sigma$	3950	正态分布	0.05
BE <sub>2</sub>	主轮掉块	对数正态分布	$\mu, \sigma$	3700	正态分布	0.05
BE <sub>3</sub>	刹车盘掉块	对数正态分布	$\mu, \sigma$	3050	正态分布	0.05
BE <sub>4</sub>	热熔塞	对数正态分布	$\mu, \sigma$	2125	正态分布	0.05
BE <sub>5</sub>	轮胎气压异常	对数正态分布	$\mu, \sigma$	3350	正态分布	0.05
BE <sub>6</sub>	充气嘴断裂	对数正态分布	$\mu, \sigma$	2085	正态分布	0.05
BE <sub>7</sub>	机轮磨损	对数正态分布	$\mu, \sigma$	2680	正态分布	0.05
BE <sub>8</sub>	软件指令故障	指数分布	$\lambda$	2 550 000	正态分布	0.05
BE <sub>9</sub>	电路短路	指数分布	$\lambda$	780 500	正态分布	0.05
BE <sub>10</sub>	控制阀故障	指数分布	$\lambda$	380 000	正态分布	0.05
BE <sub>11</sub>	转换阀故障	指数分布	$\lambda$	320 000	正态分布	0.05
BE <sub>12</sub>	液压保险故障	指数分布	$\lambda$	360 000	正态分布	0.05
BE <sub>13</sub>	刹车装置故障	对数正态分布	$\mu, \sigma$	2480	正态分布	0.05
BE <sub>14</sub>	应急转换阀失效	对数正态分布	$\mu, \sigma$	2110	正态分布	0.05
BE <sub>15</sub>	应急液压保险失效	对数正态分布	$\mu, \sigma$	2180	正态分布 </td <td>0.05</td>	0.05
BE <sub>16</sub>	应急刹车装置失效	对数正态分布	$\mu, \sigma$	2720	正态分布	0.05

表 2 轮胎爆破 ETA 控制事件模糊区间分布不确定性描述

Tab. 2 Uncertainty description of control events of tire burst accident subject to fuzzy interval distribution

编号	控制事件	取值区间	隶属度	隶属函数
SE <sub>1</sub>	启动应急刹车系统	(0.135, 0.165, 0.15)	$\lambda$	$\mu_{0.15}(\lambda)$
SE <sub>2</sub>	避让飞机、建筑物	(0.153, 0.187, 0.17)	$\lambda$	$\mu_{0.17}(\lambda)$
SE <sub>3</sub>	增设隔离网	(0.090, 0.101, 0.10)	$\lambda$	$\mu_{0.10}(\lambda)$
SE <sub>4</sub>	启动应急消防措施	(0.045, 0.055, 0.05)	$\lambda$	$\mu_{0.05}(\lambda)$

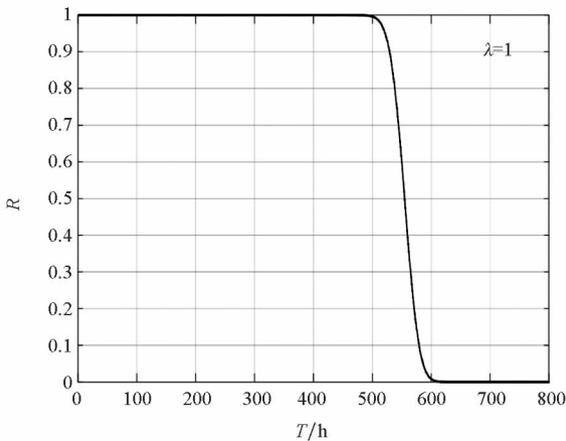


图 5 一定隶属度下航空安全性指标

Fig. 5 Aviation safety index under certain membership

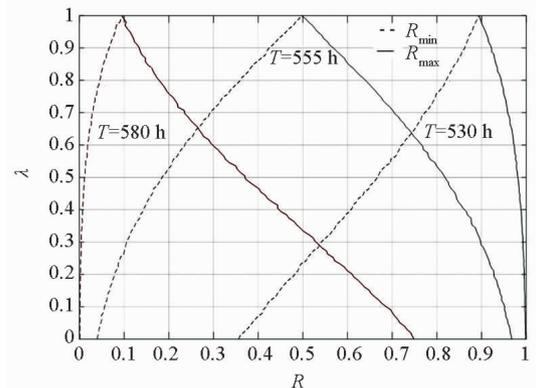


图 6 一定飞行小时下航空安全性指标与隶属度的关系

Fig. 6 Relationship of aviation safety and the membership under certain flight time

不难发现,在隶属度  $\lambda = 1$  时安全指标的最大值与最小值相等,这是由于此时控制事件 SE 的模糊区间是一定值,即区间中点值。同时,飞行时间  $T$  为 530 h、555 h、580 h 的三个时刻,图 6 与图 5 中对应时刻的安全指标  $R$  分别相等,且随着飞行时间的增大而增大,证明了图 6 的合理性、准确性。当飞行时间  $T$  一定时,航空安全指标  $R$  随隶属度  $\lambda$  变化比较显著。航空安全性指标的最大值随着隶属度的增大而减小,而最小值随着隶属度的增大而增大。分析原因为隶属度增大导致控制事件发生概率  $P^{SE}$  的水平截集发生变化,即事件发生最大值  $\overline{P^{SE}}$  减小,最小值  $\underline{P^{SE}}$  增大,导致该隶属水平的安全指标概率区间改变。因此,对于航空活动中控制事件这类主观不确定风险变量,选取合适的隶属度限制其模糊区间,能够使总体安全性指标控制在可接受的水平。

## 5 结论

本文针对航空安全评估中的困难,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;基于 Bow-tie 模型理论进行安全性建模,提出混合不确定条件下基于后果事件发生严重程度的航空安全性指标,并根据 Monte-Carlo 算法得到易求解的航空安全数值指标,该指标能够直接有效描述各类事件导致的不同航空事故发生的可能性;借助成熟的飞机轮船爆破事件模型开展 Monte-Carlo 仿真分析,证明了混合变量描述方法在实际运用中的合理性、可操作性,对航空安全风险评估的定性、定量工作具有重要意义。本文提出的方法、模型是基于单一顶事件开展航空安全风险评估。由于航空器是一类复杂系统,需要考虑大量的顶事件,如何基于本指标开展航空安全性设计,有待进一步研究。另外,本文使用的 Bow-tie 模型和 Monte-Carlo 方法可以被更加先进的模型和更高效的方法取代,实现更加快速、精确的风险评估工作。

## 参考文献 (References)

[1] SAE Aerospace. Safety assessment of transport airplanes in commercial service [S]. New York: Society of Automotive

Engineers, 2003: 43 - 48.

- [2] International Civil Aviation Organization. Safety management manual (SMM) [S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2013: 30.
- [3] ECSS Secretariat. ECSS - M - 00 - 03A risk management [S]. Paris: European Space Agency, 2000.
- [4] Santhosh T V, Fernandes B G. An approach for reliability prediction of instrumentation & control cables by artificial neural networks and weibull theory for probabilistic safety assessment of NPPs [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 170: 31 - 44.
- [5] Shyr H J. A quantitative model for aviation safety risk assessment [J]. Computer & Industrial Engineering, 2008, 54(1): 34 - 44.
- [6] Wei P F, Lv Z Z, Song J W. Variable importance analysis: a comprehensive review [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142: 399 - 432.
- [7] 徐庆宏, 孙有朝, 李龙彪. 航空发动机部件故障风险评估方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2016, 35(8): 1291 - 1296.
- XU Qinghong, SUN Youchao, LI Longbiao. Study on risk assessment method for aero-engine component failure [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(8): 1291 - 1296. (in Chinese)
- [8] 郭媛媛, 李龙彪, 胡宇群, 等. 民用飞机运行风险评估方法 [J]. 航空工程进展, 2016, 7(2): 253 - 258.
- GUO Yuanyuan, LI Longbiao, HU Yuqun, et al. Operation risk assessment method of civil aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(2): 253 - 258. (in Chinese)
- [9] 韦艺, 陈新锋. 民用运输航空器安全性评估系统研究 [J]. 航空维修与工程, 2010, 1(6): 74 - 77.
- WEI Yi, CHEN Xinfeng. Research of safety risk evaluation system for civil transportation aircraft [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2010, 1(6): 74 - 77. (in Chinese)
- [10] 郭媛媛, 李龙彪, 胡宇群, 等. 基于蒙特卡罗方法的民用飞机故障风险评估方法 [J]. 航空学报, 2017, 38(10): 221126.
- GUO Yuanyuan, LI Longbiao, HU Yuqun, et al. Failure risk assessment method of civil aircraft based on Monte Carlo method [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(10): 221126. (in Chinese)
- [11] Song S F, Lv Z Z, Cui L J. A generalized boronovo's importance measure for fuzzy input uncertainty [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2012, 189(1): 53 - 62.
- [12] Washington A, Clothier R A, Williams B P. A Bayesian approach to system safety assessment and compliance assessment for unmanned aircraft systems [J]. Journal of Air Transport Management, 2017, 62: 18 - 33.
- [13] Cui L J, Zhang J K, Ren B, et al. Research on a new aviation safety index and its solution under uncertainty conditions [J]. Safety Science, 2018, 107(2): 55 - 61.