

# 结冰条件下直升机飞行风险模糊综合评估

唐扬刚, 张惠, 吴敬涛

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 提高结冰条件下直升机的飞行安全, 对飞行风险进行评估。**方法** 基于模糊综合评估方法, 综合考虑结冰气象条件、防/除冰系统状态和飞行员经验的影响, 建立飞行风险评估方法。通过算例对建立的飞行风险评估方法进行了验证分析。**结果** 基于结冰强度确定了飞行风险 4 级划分方法, 利用层次分析法 (AHP) 确定各因素的权重, 采用正态分布隶属函数建立评估矩阵, 对权重集和评估矩阵进行加权平均运算, 并对评估结果向量进行处理以给出最终的风险等级。**结论** 该方法具有科学性和实用性。

**关键词:** 结冰条件; 飞行风险; 模糊综合评估; 层次分析法

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.012

**中图分类号:** X949 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)11-0079-06

## Fuzzy Comprehensive Evaluation of Helicopter Flight Risk under Icing Conditions

TANG Yang-gang, ZHANG Hui, WU Jing-tao

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the flying safety of helicopter under icing conditions and evaluate the flight risks. A flight risk evaluation method was established based on the fuzzy comprehensive evaluation method, which took the effects of icing weather conditions, anti-icing/de-icing system status and pilot experience level into consideration. Based on the icing strength, the 4-level flight risk classification method was established. The weight of each factor was determined by analytic hierarchy process. Then, the normal distribution membership function was used to establish the evaluation matrix. The weighted average method was used to the weight set and the evaluation matrix. The evaluation result vector was processed to classify the final flight risk. The method was reasonable and feasible.

**KEY WORDS:** icing conditions; flight risk; fuzzy comprehensive evaluation; analytic hierarchy process

直升机由于其垂直起降、空中悬停等优点, 被广泛用于军事、交通运输、救灾等领域。直升机飞行高度多处于 6000 m 以下, 在此高度范围内, 经常发生结冰。直升机旋翼结冰后, 翼型气动性能恶化, 升力系数下降, 阻力系数、旋翼需用功率增大, 严重时会导致直升机丧失高度, 极大地影响飞行安全<sup>[1-3]</sup>。当积冰到一定程度时, 积冰受高速旋转旋翼离心力的作

用易发生脱落, 脱落冰块有可能撞击机身, 造成机械损伤。因此评估直升机在结冰条件下的飞行风险对于制定合理的飞行策略, 保障飞行安全具有重要的作用。

结冰条件下的飞行风险分析一直是国内外航空界较为关注的问题。Bragg 等<sup>[4]</sup>提出了估算结冰后气动参数的模型。Hui 等<sup>[5]</sup>通过对 Convair 580 飞机的建

收稿日期: 2020-03-21; 修订日期: 2020-04-15

Received: 2020-03-21; Revised: 2020-04-15

作者简介: 唐扬刚 (1991—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为飞机气候环境适应性分析与验证技术。

**Biography:** TANG Yang-gang (1991—), Male, Master, Assistant engineer, Research focus: aircraft climate and environmental adaptability analysis and verification technology.

模研究,指出可以使用无量纲的参数去体现积冰后配平以及稳定性和操纵性参数的变化。薛源等<sup>[5]</sup>基于二维极值样本的 Copula 分布模型,求出了不同结冰程度下的飞行风险概率值。上述研究针对的是固定翼飞行,利用飞机结冰后飞行性能参数的改变情况进行风险分析,然而在实际情况中,不可能等待飞机结冰后再进行风险分析,因此需要一种能提前评估结冰件下直升机飞行风险的方法。结冰条件下直升机飞行风险受到结冰气象条件、防/除冰系统状态和飞行员经验的影响,当遭遇结冰条件时,综合考虑这三个因素,快速地评估出飞行风险,从而决定接下来采取的飞行措施,保证飞行安全。

目前的综合评估方法有层次分析法<sup>[7]</sup>、基于灰色理论的评估法<sup>[8]</sup>、模糊综合评估法<sup>[9]</sup>等。其中,模糊综合评估法可对受到多种因素制约的事物或对象进行定量分析,做出一个总体的评估,它具有结果清晰、系统性强的特点,且能较好地解决含有模糊因素的问题。考虑到结冰条件下直升机飞行风险受到多个因素的影响,且个别因素具有模糊性,因此文中基于模糊综合评估方法对结冰条件下直升机的飞行风险进行评估。

## 1 飞行风险评估模型

模糊综合评估方法包括因素集、评语集、评估矩阵、权重集和合成算法五部分内容。

### 1.1 因素集

因素集是引起直升机飞行风险的各项因素的集合,主要包括结冰条件、防/除冰系统状态以及飞行员经验等级三个因素。因素集  $U$  可记为:

$$U=(U_1, U_2, U_3)=(\text{结冰条件, 防/除冰系统状态, 飞行员经验等级}) \quad (1)$$

上述三个因素可细化为二级子因素。对于因素  $U_1$ , FAR-29 和 CCAR-29R1 附录 C 给出了连续最大和间断最大结冰条件,它们是由空气温度 ( $\theta$ )、液态水含量 ( $w_{LWC}$ ) 和平均容积直径 ( $d_{MVD}$ ) 三个条件确定的,因此确定  $U_1$  子因素为:

$$U_1=(u_{11}, u_{12}, u_{13})=(\theta, w_{LWC}, d_{MVD}) \quad (2)$$

周期型电加热防/除冰系统是目前直升机普遍采用的防/除冰技术。电热防/除冰系统在设计时是将某一结冰条件作为设计状态,在该设计状态下,防/除冰系统需要连续不断地工作才能保证结冰对直升机的安全飞行不会构成重大威胁。因此,当评估防/除冰系统状态对飞行风险的影响时,可用实际的结冰气象条件与防/除冰系统设计状态之间的比值作为评估的指标,即当结冰条件弱于设计状态,则飞行风险较小,反之则飞行风险较大。对于电热防/除冰系统,在选取设计状态时是以大气温度和液态水含量为参

数,故采用相对温度以及相对液态水含量来描述防/除冰系统工作状态:

$$U_2=(u_{21}, u_{22})=(\theta_r, w_{LWC_r}) \quad (3)$$

式中:  $T_r$  表示实际结冰条件温度与防/除冰系统设计状态温度的比值;  $w_{LWC_r}$  表示实际结冰条件与防/除冰系统设计状态液态水含量的比值。

飞行员经验等级可以通过飞行员反应时间和飞行员级别来描述。飞行员反应时间指飞行员从发现直升机旋翼结冰或性能改变到采取相应措施的时间,它反映了飞行员的生理和心理素质,以及对突发情况的应急处置能力,用  $t$  表示。飞行员级别则综合反映了飞行员的飞行时间、飞行技能、理论知识等多方面的能力,是飞行员综合素质的具体表现,用  $L$  表示。

综上所述,确定  $U_3$  的子因素为:

$$U_3=(u_{31}, u_{32})=(t, L) \quad (4)$$

### 1.2 评语集

评语集是飞行风险的量化分级的集合。美国联邦航空条例 (FAR) 和航空信息手册 (AIM) 将结冰强度划分为 4 个等级,而结冰强度直接关系着飞行风险,因此将结冰条件下直升机的飞行风险也划分为 4 个等级,即安全、低风险、中风险和高风险,与结冰强度等级一一对应。确定评语集  $V$  为:

$$V=(v_1, v_2, v_3, v_4)=(\text{安全, 低风险, 中风险, 高风险})=(1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

### 1.3 评估矩阵

评估矩阵是因素集到评语集的模糊映射,它反映了各因素与各评语的接近程度。假设有  $m$  个因素,  $n$  个评语,则评估矩阵  $R$  可表示为:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中:  $r_{ij}$  为第  $i$  个因素对第  $j$  个评语的隶属度,表示因素  $i$  对评语  $j$  的接近程度,隶属度可以通过隶属函数计算得到。

#### 1.3.1 隶属函数

采用正态分布隶属函数计算隶属度。根据评估对象性质的不同,可分为偏小型、中间型和偏大型正态分布隶属函数,如图 1 所示。

偏小型正态分布隶属函数表达式为:

$$r_{i1}(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i \leq a_{i1} \\ e^{-\frac{(x_i - a_{i1})^2}{\sigma_{i1}^2}} & x_i > a_{i1} \end{cases} \quad (7)$$

中间型正态分布隶属函数表达式为:

$$r_{ij}(x_i) = e^{-\frac{(x_i - a_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}} \quad (8)$$

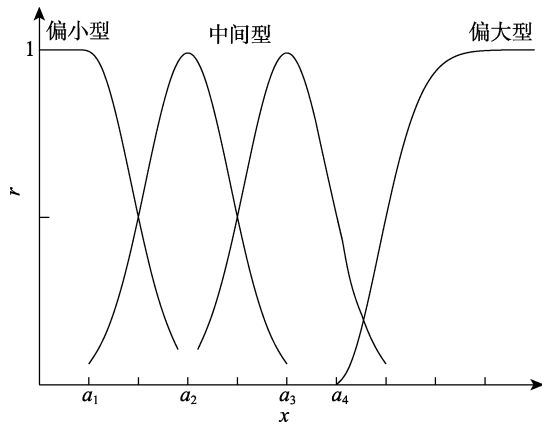


图 1 正态分布隶属函数

Fig.1 Normal distribution membership function

偏大型正态分布隶属函数表达式为：

$$r_{i4}(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i \leq a_{i4} \\ 1 - e^{-\frac{(x_i - a_{i4})^2}{\sigma_{i4}^2}} & x_i > a_{i4} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $x_i$ 为某一因素的数值大小； $a_{ij}$ 、 $\sigma_{ij}$ 为正态分布隶属函数参数。

根据评估矩阵的定义，需要计算每一个因素对各个评语的隶属度，那么每计算一个隶属度都应对应一个隶属函数。这就需要确定各隶属函数的参数。

### 1.3.2 隶属函数参数的确定

根据正态分布隶属函数的表达式和图 1 可知，其参数  $a_{ij}$ 、 $\sigma_{ij}$  与各因素对应的各风险等级的取值范围有关，因此首先要确定各因素对应的各风险等级的取值范围。通过文献调研<sup>[10-14]</sup>，分析确定了所有取值，见表 1。

表 1 风险等级取值范围  
Tab.1 Range of risk levels

| 因素                                     | 安全           | 低风险              | 中风险              | 高风险          |
|--|--------------|------------------|------------------|--------------|
| $\theta/^\circ\text{C}$                | $\leq -30$   | $-30 \sim -25$   | $-25 \sim -15$   | $-15 \sim 0$ |
| $w_{LWC}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ | $0 \sim 0.2$ | $0.2 \sim 0.5$   | $0.5 \sim 1$     | $\gg 1$      |
| $d_{MVD}/\mu\text{m}$                  | $\leq 15$    | $15 \sim 25$     | $25 \sim 40$     | $\gg 40$     |
| $T_r$                                  | $0 \sim 0.2$ | $0.2 \sim 0.5$   | $0.5 \sim 1$     | $> 1$        |
| $w_{LWCr}$                             | $0 \sim 0.2$ | $0.2 \sim 0.5$   | $0.5 \sim 1$     | $> 1$        |
| $t/\text{s}$                           | $\leq 0.06$  | $0.06 \sim 0.15$ | $0.15 \sim 0.30$ | $> 0.30$     |
| $L$                                    | 0            | 1                | 2                | 3            |

文献[15]给出了正太分布隶属函数参数确定方法，参考该方法确定了上述正太分布隶属函数的参数，见表 2。表 2 中的隶属函数类型表示计算某因素对某一评语的隶属度时采用的正态分布隶属函数的类型。

表 2 隶属函数参数

Tab.2 Parameters of membership function

| 风险等级 | 参数            | $U_1$    |          |          | $U_2$    |          | $U_3$    |          |
|------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|      |               | $u_{11}$ | $u_{12}$ | $u_{13}$ | $u_{21}$ | $u_{22}$ | $u_{31}$ | $u_{32}$ |
| 安全   | $a_{i1}$      | -30      | 0.1      | 7.5      | 0.1      | 0.1      | 0.03     | 0        |
|      | $\sigma_{i1}$ | 0.6      | 0.12     | 9        | 0.12     | 0.12     | 0.036    | 0.6      |
|      | 采用的隶属函数       | 偏小型      |          |          | 中间型      |          |          |          |
| 低风险  | $a_{i2}$      | -27.5    | 0.35     | 20       | 0.35     | 0.35     | 0.105    | 1        |
|      | $\sigma_{i2}$ | 3        | 0.18     | 6        | 0.18     | 0.18     | 0.054    | 0.6      |
|      | 采用的隶属函数       | 中间型      |          |          | 中间型      |          |          |          |
| 中风险  | $a_{i3}$      | -20      | 0.75     | 32.5     | 0.75     | 0.75     | 0.225    | 2        |
|      | $\sigma_{i3}$ | 6        | 0.3      | 9        | 0.3      | 0.3      | 0.09     | 0.6      |
|      | 采用的隶属函数       | 中间型      |          |          | 中间型      |          |          |          |
| 高风险  | $a_{i4}$      | -7.5     | 0.75     | 32.5     | 0.75     | 0.75     | 0.225    | 3        |
|      | $\sigma_{i4}$ | 9        | 0.3      | 9        | 0.3      | 0.3      | 0.09     | 0.6      |
|      | 采用的隶属函数       | 中间型      |          | 偏大型      |          | 中间型      |          |          |

## 1.4 权重集

### 1.4.1 层次分析法

权重集是各因素对飞行风险影响程度大小的集合。采用层次分析法确定各因素的权重，首先构造判断矩阵。判断矩阵表示层次结构模型中，针对上一层次某元素，本层次有关元素之间两两比较而得出的相对权重，即哪一个更重要且重要多少，可以按照 1—

9 标度法对重要性程度赋值，判断矩阵标度及其含义见表 3。

假设某一层有  $k$  个因素，则判断矩阵  $A$  可表示为：

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{pmatrix} \quad (10)$$

通过求解判断矩阵的最大特征根对应的特征向量作为因素的权重集，因此需要求解特征方程：

表3 判断矩阵标度及其含义  
Tab.3 Scaling of judgment matrix and its meaning

| 标度         | 含义   |
|------------|--|
| 1          | 两个元素具有同样的重要性   |
| 3          | 两个元素比较,前者比后者稍显重要   |
| 5          | 两个元素比较,前者比后者明显重要   |
| 7          | 两个元素比较,前者比后者强烈重要   |
| 9          | 两个元素比较,前者比后者极端重要   |
| 2, 4, 6, 8 | 表示上述相邻判断的中间值   |
| 倒数         | 若第 <i>i</i> 个元素与第 <i>j</i> 个元素的重要性比值为 $a_{ij}$ ,那么第 <i>j</i> 个元素与第 <i>i</i> 个元素的重要性比值为 $a_{ji}=1/a_{ij}$ 。 |

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (11)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵A的最大特征根;W为 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量,其分量 $w_i$ 即为相应元素的权重值。

需要注意的是,特征向量W能作为权重集的前提是判断矩阵A满足一致性要求。采用 $\lambda_{\max}$ 与k的接近程度作为一致性的判断指标,一致性指标CI计算公式为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - k}{k - 1} \quad (12)$$

CI值越小,表明一致性越好,反之则越差。判断矩阵非一致性的容许范围通过引入平均随机一致性指标RI进行计算:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

式中:CR为一致性比率;CI为一致性指标;RI为平均随机一致性指标。

RI的数值可以通过查表得到,见表4。

表4 平均随机一致性指标  
Tab.4 Average random consistency indexes

| 判断矩阵阶数 <i>n</i> | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|-----------------|------|------|------|------|------|
| RI值             | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.90 | 1.12 |

当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性在容许的范围内,W可作为该层因素的权重集。当 $CR \geq 0.1$ 时,判断矩阵一致性较差,需要调整判断矩阵,重新进行一致性检验。

### 1.4.2 权重计算结果

第一层的评估因素有三个:结冰条件、防/除冰系统状态、飞行员经验等级。结冰条件是结冰的基础,不同的结冰条件将会导致结冰速率、冰形等有明显的差异,而防/除冰系统可以保证直升机在一定的结冰条件范围内安全飞行,二者对于结冰条件下飞行风险的评估都有显著的影响。因此结冰条件与防/除冰系统状态同等,标度设为1。飞行员经验主要影响飞行员对结冰条件和防/除冰系统工作状态以及飞行状态

的判断,比结冰条件和防/除冰系统的状态对飞行风险的影响稍小,因此结冰条件和防/除冰系统状态对飞行员经验的标度设为2,得到第一层因素判断矩阵A为:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

判断矩阵A的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和对应的特征向量W经过计算分别为:

$$\lambda_{\max} = 3, W = (0.4 \quad 0.4 \quad 0.2) \quad (15)$$

进行一致性检验,一致性指标 $CI = 0$ ,说明判断矩阵符合层次分析法的一致性准则,特征向量W可以作为第一层因素的权重。

结冰条件、防/除冰系统状态和飞行员经验由第二层子因素构成,分别计算它们的权重。结冰条件 $U_1$ 由温度 $\theta$ 、 $w_{LWC}$ 和 $d_{MVD}$ 三个子因素构成,研究表明,温度对结冰冰形的影响最大, $w_{LWC}$ 和 $d_{MVD}$ 次之<sup>[16]</sup>,因此温度比 $w_{LWC}$ 和 $d_{MVD}$ 稍显重要,标度都设为2, $w_{LWC}$ 和 $d_{MVD}$ 同等重要,标度设为1,得到它们的判断矩阵 $A_1$ 为:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

判断矩阵A的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和对应的特征向量 $W_1$ 经过计算分别为:

$$\lambda_{\max} = 3, W_1 = (0.5 \quad 0.25 \quad 0.25) \quad (17)$$

进行一致性检验,一致性指标 $CI = 0$ ,满足一致性要求, $W_1$ 可作为结冰条件子因素的权重集。

防/除冰系统状态 $U_2$ 由 $T_r$ 、 $w_{LWCr}$ 两个子因素构成,对于电热防/除冰系统,其工作状态由加热时间和断热时间来控制,且加热时间与断热时间的范围都受到其设计状态参数的制约<sup>[18]</sup>,也就是说设计状态的温度和LWC共同决定了防/除冰系统的适用范围。因此 $\theta_r$ 、 $w_{LWCr}$ 在评估防/除冰系统状态对飞行风险的影响时有同等重要的地位,由此确定这两个子因素的权重为:

$$W_2 = (0.5 \quad 0.5) \quad (18)$$

飞行员经验等级 $U_3$ 由两个子因素组成,即飞行员反应时间*t*和飞行员级别*L*。飞行员反应时间体现了飞行员发现结冰或性能下降后的处置能力,而飞行员级别则反映了飞行员对直升机结冰与性能变化的判断能力,它们居于同等重要的地位,因此确定这两个子因素的权重为:

$$W_3 = (0.5 \quad 0.5) \quad (19)$$

### 1.5 合成算法

采用适当的算法对权重集W和评估矩阵R进行合成运算,从而得到综合评判结果向量B。常用的合

成算法有主因素决定型、主因素突出型和加权平均算法。为了综合考虑所有因素对飞行风险的影响，文中采用加权平均算法来进行合成运算，即：

$$\mathbf{B} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (20)$$

式中： $b_j = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij} (j=1, \dots, n)$ 。

评估结果向量  $\mathbf{B}$  是  $\mathbf{V}$  上的模糊集，再对评估结果向量进行处理以给出一个确定的风险等级，采用加权平均法对  $\mathbf{B}$  进行处理。加权平均法以各评估等级

$v_j$  的隶属度  $b_j$  为权系数，取各  $v_j$  的加权平均值作为评估结果，即：

$$C = \sum_{j=1}^n b_j v_j / \sum_{j=1}^n b_j (j=1, 2, \dots, n) \quad (21)$$

## 2 算例分析

采用上文建立的风险评估模型对直升机在表 5 中所列的条件下的飞行风险等级进行评估。

表 5 飞行风险影响因素  
Tab.5 Influencing factors of flight risk

|         | 结冰条件                    |   |                              | 防/除冰系统状态                  |   | 飞行员经验等级      |     |
|---------|-------------------------|---|------------------------------|---------------------------|---|--------------|-----|
|         | $\theta/^\circ\text{C}$ | $w_{\text{LWC}}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ | $d_{\text{MVD}}/\mu\text{m}$ | $\theta_r/^\circ\text{C}$ | $w_{\text{LWC}_r}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ | $t/\text{s}$ | $L$ |
| 数值      | -12                     | 0.6   | 35                           | 0.6                       | 0.4   | 0.17         | 1   |
| 对应的风险等级 | 高                       | 中   | 中                            | 中                         | 低   | 中            | 低   |

首先进行一级模糊综合评估，采用上文确定的正态分布隶属函数计算得到结冰条件三个子因素的评估矩阵为：

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.1690 & 0.7788 \\ 0.0000 & 0.1453 & 0.7788 & 0.0000 \\ 0.0001 & 0.0019 & 0.9257 & 0.0743 \end{pmatrix} \quad (22)$$

对  $\mathbf{W}_1$  和  $\mathbf{R}_1$  采用加权平均算法进行合成运算，得到结冰条件的评估结果向量  $\mathbf{B}_1$ ：

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{W}_1 \cdot \mathbf{R}_1 = (0.0000 \quad 0.0368 \quad 0.5106 \quad 0.4080) \quad (23)$$

同样的方法计算得到防/除冰系统状态和飞行员经验等级的评估结果向量  $\mathbf{B}_2$ 、 $\mathbf{B}_3$ ：

$$\mathbf{B}_2 = (0.0010 \quad 0.5355 \quad 0.5176 \quad 0) \quad (24)$$

$$\mathbf{B}_3 = (0.0311 \quad 0.6174 \quad 0.3753 \quad 0) \quad (25)$$

再进行二级模糊综合评估，将得到的评估结果向量组成的向量集作为二级模糊综合评估的评估矩阵：

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0000 & 0.0368 & 0.5106 & 0.4080 \\ 0.0010 & 0.5355 & 0.5176 & 0.0000 \\ 0.0311 & 0.6174 & 0.3753 & 0.0000 \end{pmatrix} \quad (26)$$

对  $\mathbf{W}$  和  $\mathbf{R}$  采用加权平均算法进行合成运算，得到最终的评估结果向量  $\mathbf{B}$ ：

$$\mathbf{B} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R} = (0.0066 \quad 0.3524 \quad 0.4863 \quad 0.1632) \quad (27)$$

再对评估结果向量  $\mathbf{B}$  进行加权平均处理，得到直升机在表 5 中的条件下飞行风险等级：

$$C = \sum_{j=1}^n b_j v_j / \sum_{j=1}^n b_j = 2.7993 \quad (28)$$

综上所述，在表 5 的条件下的飞行风险等级为 2.7993。该风险等级处于中等风险和高风险之间，更加偏向中等风险。表 5 中大部分子因素处于中风险等

级，综合评估的结果与之对应，表明文中建立的评估模型能综合考虑各因素影响，从而给出一个合理的风险等级。

## 3 结论

文中基于模糊综合评估方法建立了结冰条件下直升机飞行风险评估模型，并通过算例对模型进行了分析验证。

1) 分析确定了影响直升机在结冰条件下飞行风险的因素，包括结冰条件、防/除冰系统状态和飞行员经验等级，并将第一层次因素进一步细化为第二层次因素。

2) 基于层次分析法，分析确定了各因素的权重。

3) 通过算例的验证表明，文中建立的评估模型能综合考虑各因素的影响，能对结冰条件下直升机的飞行风险做出一个合理的评估。

### 参考文献：

[1] BRITTO R K, BOND T H. A Review of Ice Accretion Data From a Model Rotor Icing Test and Comparison With Theory[C]// 29th Aerospace Sciences Meeting. Reno, 1991.

[2] FORTIN G, PERRON J. Spinning Rotor Blade Tests in Icing Wind Tunnel[C]// 1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. San Antonio, Texas, 2009.

[3] NASA/TM-217126, Analysis of a Hovering Rotor in Icing Conditions[S].

[4] BRAGG M B, PERKINS W R, SARTER N B, et al. An Interdisciplinary Approach to Inflight Aircraft Icing Safety[C]// 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 1998.

- [5] HUI K, WOLED M, BROWN A. Flight Dynamics Model of Turboprop Transport Aircraft Ining Effects Based on Preliminary Flight Data[C]// 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 2005.
- [6] 薛源, 徐浩军, 胡孟权. 结冰条件下人-机-环系统的飞行风险概率[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3328-3339.  
XUE Yuan, XU Hao-jun, HU Meng-quan. Flight risk Probability of Pilot-aircraft-environment System under Icing Conditions[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3328-3339.
- [7] 吴春林, 郭三学. 基于模糊层次分析法的反恐装备体系作战效能评估[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 129-133.  
WU Chun-lin, GUO San-xue. Evaluation of Operational Effectiveness of Anti-terrorism Equipment System Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 129-133.
- [8] 宋肖苗, 杨剑锋, 陈良超, 等. 多层次灰色综合评价法在储罐失效概率评估中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 156-161.  
SONG Xiao-miao, YANG Jian-feng, CHEN Liang-chao, et al. Application of Grey Multi-hierarchy Comprehensive Evaluation Method in Failure Probability Assessment of Storage Tanks[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 156-161.
- [9] 赵建忠, 张磊, 李保刚. 武器装备维修器材供应效果的模糊综合评估方法研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 45-50.  
ZHAO Jian-zhong, ZHANG Lei, LI Bao-gang. Research on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method of Ordnance Maintenance Material Supply Effectiveness[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 45-50.
- [10] FLEMMING R J, MURTY H, PAPADAKIS M, et al. The Design, Fabrication, and Testing of Simulated Ice Shapes for the S-92A Helicopter[C]// 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 2004.
- [11] FLEMMING R J, ALLDRIDGE P, DOEPPNER R. Artificial Icing Tests of the S-92A Helicopter in the Mckinley Climatic Laboratory[C]// 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 2004.
- [12] 李国知, 曹义华. 旋翼结冰对直升机飞行动力学特性的影响[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 187-194.  
LI Guo-zhi, CAO Yi-hua. Effect of Rotor Icing on Helicopter Flight Dynamic Characteristics[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 187-194.
- [13] 刘伟光, 高保方, 张功虎, 等. 直升机结冰强度设计标准研究[J]. 直升机技术, 2011, 167(2): 30-33.  
LIU Wei-guang, GAO Bao-fang, ZHANG Gong-hu, et al. Research of Icing Severity Standards for Helicopter[J]. Helicopter technique, 2011, 167(2): 30-33.
- [14] 王健名, 徐浩军, 薛源, 等. 基于极值理论的平尾结冰飞行风险评估[J]. 航空学报, 2016, 37(10): 3011-3022.  
WANG Jian-ming, XU Hao-jun, XUE Yuan, et al. Flight Risk Evaluation of Tailplane Icing Based on Extreme Value Theory[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2016, 37(10): 3011-3022.
- [15] 唐扬刚, 贺小帆, 刘文琰, 等. 飞机连接结构防护涂层老化损伤量化评估方法[J]. 航空学报, 2017, 38(1): 220217-1-220217-13.  
TANG Yang-gang, HE Xiao-fan, LIU Wen-ting, et al. Quantitative Method for Evaluating Aging Damage of Protective Coatings of Aircraft Joint Structures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(1): 220217-1-220217-13.
- [16] 徐玉貌, 吕少杰, 曹义华, 等. 旋翼桨叶结冰对直升机飞行性能的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 31(2): 399-404.  
XU Yu-mao, LYU Shao-jie, CAO Yi-hua, et al. Effects of Rotor Blade Icing on Helicopter Flight Performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(2): 399-404.
- [17] BRITTON R K, BOND T H. A Review of Ice Accretion Data from a Model Rotor Icing Test and Comparison with Theory[C]// 29th Aerospace Sciences Meeting. Reno, 1991.
- [18] 杨常卫, 张功虎, 孙涛, 等. 黑鹰直升机旋翼桨叶防/除冰系统研究[J]. 直升机技术, 2011, 166(1): 37-44.  
YANG Chang-wei, ZHANG Gong-hu, SUN Tao, et al. Development of Black Hawk Helicopter Rotor Blade Anti-/de-icing System[J]. Helicopter technique, 2011, 166(1): 37-44.