

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0726

基于中国鸟情的鸟撞适航条款充分性和适宜性

陆晓华^{1,*}, 蔡景¹, 张柱国², 张迎春²

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106; 2. 中国民用航空上海航空器适航审定中心, 上海 200335)

摘 要: 以中国民航近十余年运输类飞机鸟撞信息为数据源, 利用混合威布尔函数拟合鸟撞能量分布, 并应用列文伯格-马夸尔特 (L-M) 寻优算法得到更为精确的拟合分布参数估计值。对照安全性指标, 通过鸟撞能量分布函数评估出现有鸟撞适航条款对机翼而言是具有充分性和适宜性的, 对尾翼而言具有充分性但过于保守。以发生灾难性事故的安全性指标为依据, 中国鸟情环境下机翼结构抗鸟撞鸟体质量最低适航要求为 1.218 kg; 同时验证了美国联邦航空局 (FAA) 在美国鸟情环境下提高机翼结构抗鸟撞鸟体质量最低适航要求的愿景 (约 3.6 kg), 证明了基于两重两参数混合威布尔分布的鸟撞冲击能量统计分析方法的有效性及其结果的可信度, 为中国民航自主修订相关适航条款修订提供了理论依据和实践参考。

关 键 词: 鸟情环境; 适航条款; 鸟撞能量分布; 评估; 充分性; 适宜性; 安全性指标

中图分类号: V221⁺.1; X915.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2024)09-2810-09

鸟的种类、数量及其地域分布尤其是机场周边的鸟情环境对飞机的安全运行有较大的影响, 飞机结构抗鸟撞设计是保障飞机安全运行的重要研究内容。美国联邦航空局 (Federal Aviation Administration, FAA) 颁布的联邦航空规章 (Federal Aviation Regulations, FAR) 25.631 条款规定, 撞击飞机尾翼的鸟体质量上限为 8 lb (1 lb ≈ 0.45 kg)^[1]; FAA 颁布的 FAR 25.571(e)(1) 条款中将鸟撞作为一种离散源损伤, 规定飞机一般结构与风挡的抗鸟撞要求要保持一致 (即 4 lb)^[1]。欧洲航空安全局 (European Aviation Safety Agency, EASA) 颁布的 25 部审定规范 (Certification Specification, CS) 中对飞机机翼和尾翼抗鸟撞鸟体质量的要求都是 4 lb^[2]。随着欧美各国飞机服役经验和鸟撞案例的不断积累, FAA 认为现代飞机使用了很多新技术, 包括一些新的关键控制系统和复合材料结构, 这些新技术的部位对鸟撞冲击载荷更为敏感, 而在最初设计抗鸟撞标准时未考虑这类新技术; 此外, 最新的美国鸟撞数据显

示, 所有的鸟撞事件中有 7.2% 的鸟体质量超过 4 lb, 有 3.6% 的鸟体质量超过 8 lb, 同时鸟的数量也在持续增加, 因此鸟撞事件的发生概率在持续增大^[3]。因此, FAA 从 1987 年开始就有意将飞机所有结构的抗鸟撞标准提高至 8 lb。但欧洲联合航空局 (Joint Aviation Agency, JAA, 2002 年欧盟成立了具有法律权限的 EASA 机构, 并全面接替了原 JAA 的职能) 认为提高飞机抗鸟撞适航标准无法从技术角度得到证实, 且欧洲的鸟撞事件统计表明, 只有 1.2% 的鸟体质量超过 4 lb、0.3% 的鸟体质量超过 8 lb^[3]。因此, JAA 决定将对飞机尾翼抗鸟撞适航要求与 FAR 25.631^[1] 条款保持差异。尽管 FAA 从 1992 年起就联合 JAA 成立特别工作组来协调鸟撞相关适航条款的差异性问题, 但双方始终没有达成一致。美国和欧洲的飞机制造商本着协调一致的精神也分别满足了 FAA 和 EASA 的现行要求。中国民航规章 (China Civil Aviation Regulation, CCAR) -25^[4] 部规章和 FAR-25^[1] 部规章除了测量单位换算

收稿日期: 2022-08-17; 录用日期: 2022-11-04; 网络出版时间: 2022-12-02 11:12

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221201.1457.002

基金项目: 国家自然科学基金 (U1933202); 中国民航局安全能力建设基金 (2021-198)

* 通信作者. E-mail: luxiaohua@nuaa.edu.cn

引用格式: 陆晓华, 蔡景, 张柱国, 等. 基于中国鸟情的鸟撞适航条款充分性和适宜性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50 (9): 2810-2818.

LU X H, CAI J, ZHANG Z G, et al. Adequacy and suitability of airworthiness clause of bird strike based on bird situation in China [J].

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50 (9): 2810-2818 (in Chinese).

差异外,在鸟撞要求上无实质性差异。CAAR/FAR 25.571(e)^[1,4]和 CS 25.571^[2]条款中对离散源损伤项中的鸟撞要求相同,只是 CS 25.571^[2]条款参照 CS 25.631^[2]条款中的规定执行。按照 FAA 颁布的鸟撞适航条款进行研制的飞机在中国特定的鸟情环境下能否达到所需的安全性水平或当前的适航条款规定是否又过于保守,这需要对鸟撞适航条款的充分性和适宜性进行研究,特别是随着中国民用飞机自主研制的推进和商业运营的投入,制定/修订适宜的鸟撞适航条款是降低鸟撞安全风险和提高运维制经济性的重要任务之一^[5]。

国内外关于鸟撞安全性分析的研究成果主要包括基于鸟撞事件统计的风险评估和关联性分析、根据鸟撞适航条款进行的试验方法、仿真技术及相关优化改进设计研究、鸟撞适航规章的解读等内容。在鸟撞风险评估方面,文献[6-8]统计分析了鸟撞事件的发生率、损伤率及鸟击发生的时间/时段、飞行高度/阶段、鸟体质量、鸟群种类之间的关联;文献[9-12]分别应用层次分析法、模糊数学法、马尔可夫链蒙特卡罗法、矩阵法对机场周边和飞行航路上的鸟撞事件进行了统计分析和风险评估。在鸟撞试验和仿真计算方面,文献[13-14]应用复合材料、人工鸟弹等新技术进行了鸟撞试验和仿真研究;文献[15-16]对飞机的关键系统和重要结构进行了抗鸟撞分析。在鸟撞适航规章的解读方面,文献[17]对鸟撞适航条款的修订背景进行了简要分析;文献[18]针对鸟撞适航要求提出了通用的符合性设计方法及流程;文献[19]对运输类飞机抗鸟撞要求的试验验证和符合性分析方法的认可审定作了进一步的解释说明;美国材料试验学会将根据鸟撞适航条款颁布的航空透明件鸟撞标准试验方法中规定的鸟体质量、鸟撞速度、试验设备、试验环境等要求都用于指导飞机其他结构的鸟撞试验^[20]。

从实际鸟情统计讨论规章条款的充分性和适宜性在国内比较少见,在国外也未有详细的研究成果。尽管目前中国运输类飞机鸟撞案例信息存在不完备等情况,但现有的鸟撞案例信息对于研究鸟环境对运输类飞机安全性的影响具有重要的参考价值。本文在收集整理近十余年中国民航鸟击航空器信息的基础上,通过走访航司航线机械员和飞行员、咨询机场防鸟驱鸟人员及查阅相关飞行手册资料,选取鸟击数据中各机型在典型航段、航路上不同飞行阶段的平均值作为该飞行阶段的代表速度值,统计分析鸟体的撞击能量分布规律,并研究现有鸟撞适航条款在中国鸟情环境下的充分性和适宜性。

1 鸟撞冲击能量的统计分析

1.1 鸟撞冲击能量值确定

鸟撞冲击能量用鸟体撞击飞机前的瞬时鸟体动能表示,即 $E = mv^2/2$,其中, m 为鸟体质量, v 为两者相对撞击速度。为确保飞机在遭受鸟撞后仍能完成安全飞行任务,CCAR 对鸟撞发生时的鸟体质量和速度的要求为^[4]:①CCAR 25.571(一般结构),鸟体质量为 1.8 kg,飞机与鸟沿飞机飞行航迹的相对速度取海平面 V_c 或海拔 2 450 m 的 0.85 V_c ,选两者中较严重者;②CCAR 25.631(尾翼),鸟体质量为 3.6 kg,飞机的速度(相对于鸟沿飞机飞行航迹)等于按 CCAR 25.335(a)选定的海平面 V_c 。

发生鸟撞时的速度主要取决于飞机当时的飞行速度,虽然通常情况下鸟撞发生时的飞行速度常难以精确获取,但多数情况下可以基本确认鸟撞发生的飞行阶段,则可取该机型在某飞行阶段的平均估计速度作为鸟撞发生时的速度。

1.2 鸟撞冲击能量分布

1.2.1 混合威布尔分布特征确定

两重混合威布尔分布定义:如果一个总集由 2 个子集组成,则各子集均服从两参数威布尔分布,但参数值不同。假设各子集的概率密度函数分别为 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$,各子集的混合权重分别为 p_1 和 p_2 ,且满足 $p_1 + p_2 = 1$,则总集的概率密度函数为

$$f(t) = p_1 f_1(t) + p_2 f_2(t) \tag{1}$$

式中: t 为概率密度函数的随机变量。

根据上述定义,每个威布尔分布子集的概率密度函数 $f_i(t)$ 表达式为

$$f_i(t) = \frac{\beta_i}{\eta_i} t^{\beta_i-1} \exp[-(t/\eta_i)^{\beta_i}] \quad i = 1, 2 \tag{2}$$

式中: β_i 和 η_i 分别为第 i 个威布尔分布子集的形状参数和比例参数。

累积分布函数 $F_i(t)$ 为

$$F_i(t) = 1 - \exp[-(t/\eta_i)^{\beta_i}] \quad i = 1, 2 \tag{3}$$

两重两参数混合威布尔分布可靠度函数可表示为

$$R(t) = p_1 R_1(t) + p_2 R_2(t) = p_1 \exp[-(t/\eta_1)^{\beta_1}] + p_2 \exp[-(t/\eta_2)^{\beta_2}] \tag{4}$$

将式(3)变换为

$$\frac{1}{1 - F(t)} = \exp(t/\eta)^{\beta} \tag{5}$$

对式(5)两边取 2 次自然对数,即

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = \beta \ln(t) - \beta \ln \eta \tag{6}$$

令

$$\begin{cases} y = \ln \ln [1/(1 - F(t))] \\ x = \ln(t) \\ b = -\beta \ln \eta \\ w = \beta \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 得到

$$y = wx + b \quad (8)$$

式(8)即转化为二维直角坐标系中的直线方程, 其中, w 为斜率, b 为截距。按照从小到大的顺序排列鸟撞冲击能量, 并通过下列中位秩式(9)计算鸟击航空器累积失效概率的估计值 $\tilde{F}(t_i)$ 。取鸟撞冲击能量的自然对数值为 x 轴, 以无量纲值 $\ln \ln [1/(1 - \tilde{F}(t))]$ 为 y 轴, 如图 1 所示。

$$\tilde{F}(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: n 为鸟撞冲击能量数据的数量。

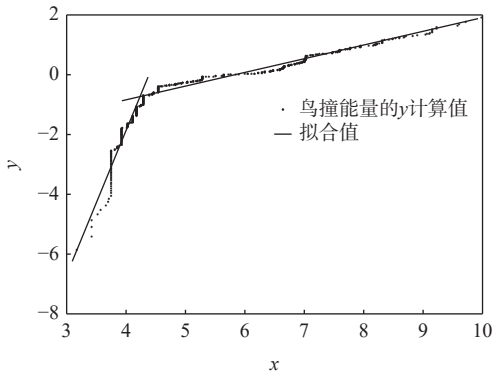


图 1 鸟撞冲击能量拟合直线

Fig. 1 Bird strike energy fitting line

图 1 中的鸟撞冲击能量拟合结果显示, 2 个子集分别对应上图中的 2 条逼近直线, 且交汇于原始数据附近的一个交点。由此初步判定, 鸟撞冲击能量数据基本符合两重两参数混合威布尔分布。

1.2.2 混合威布尔分布参数估计

由式(4)可知, 两重两参数混合威布尔分布的可靠度概率函数可表示为

$$P(t) = p_1 R_1(t) + p_2 R_2(t) = p_1 \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta_1} \right)^{\beta_1} \right] + p_2 \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta_2} \right)^{\beta_2} \right] \quad (10)$$

以 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$ 表征两重两参数混合威布尔分布函数的参数向量, 其中, 各分量分别代表参数 p_1 、 η_1 、 β_1 、 η_2 和 β_2 。则式(10)可改写为

$$P(t, \mathbf{x}) = x_1 \exp \left[-\left(\frac{t}{x_2} \right)^{x_3} \right] + (1 - x_1) \exp \left[-\left(\frac{t}{x_4} \right)^{x_5} \right] \quad (11)$$

由式(9)可得鸟撞冲击能量的概率 $\tilde{P}(t)$ 观测值为

$$\tilde{P}(t_i) = 1 - \tilde{F}(t_i) = 1 - \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

建立最优参数 $\mathbf{x}$ 的优化目标函数为

$$\min \lambda(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i^2(\mathbf{x}) \quad (13)$$

式中: $r_i(\mathbf{x})$ 为残差量, 即 $r_i(\mathbf{x}) = \tilde{P}(t_i) - P(t_i, \mathbf{x})$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

根据混合威布尔分布函数的性质, 各参数值应满足下列约束条件: $0 < p_1 < 1$, $\eta_1 > 0$, $\beta_1 > 0$, $\eta_2 > 0$, $\beta_2 > 0$ 。

列文伯格-马夸尔特法寻优算法^[21]是一种无约束优化算法, 其核心为: 在 Gauss-Newton 方向和最速下降方向之间采用二阶微分和方向矢量不断调整函数计算的收敛方向, 从而获得更快的收敛速度。应用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, L-M)算法进行无约束优化求解目标函数的解, 拟通过式(14)和式(15)进行参数变换去除约束条件。令

$$x_1 = \frac{\exp(\theta_1)}{\exp(\theta_1) + \exp(-\theta_1)} \quad (14)$$

$$x_j = \exp(\theta_j) \quad j = 2, 3, 4, 5 \quad (15)$$

令 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T$, 将式(14)和式(15)代入式(11), 即

$$P(t, \boldsymbol{\theta}) = \frac{\exp(\theta_1)}{\exp(\theta_1) + \exp(-\theta_1)} \exp \left[-\left(\frac{t}{\exp(\theta_2)} \right)^{\exp(\theta_3)} \right] + \left(1 - \frac{\exp(\theta_1)}{\exp(\theta_1) + \exp(-\theta_1)} \right) \exp \left[-\left(\frac{t}{\exp(\theta_4)} \right)^{\exp(\theta_5)} \right] \quad (16)$$

经过变换, 式(13)转变为无约束优化问题:

$$\min \lambda(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i^2(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\tilde{P}(t_i) - P(t_i, \boldsymbol{\theta}))^2 \quad (17)$$

求得 $\boldsymbol{\theta}$ 的最优解后, 可通过式(14)和式(15)求出鸟撞冲击能量数据两重两参数混合威布尔分布的 5 个未知参数。

L-M 算法中非线性最小二乘迭代法为

$$\boldsymbol{\theta}^{(k+1)} = \boldsymbol{\theta}^{(k)} - \left[\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^{(k)})^T \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^{(k)}) + \mathbf{I}^{(k)} \times \text{diag} \left(\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^{(k)})^T \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^{(k)}) \right) \right]^{-1} \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^{(k)})^T \mathbf{r}(\boldsymbol{\theta}^{(k)}) \quad (18)$$

式中: k 为迭代增量变量; $\mathbf{I}^{(k)}$ 为第 k 次迭代下的步长; $\boldsymbol{\theta}^{(k)}$ 为第 k 次迭代下的参数估计值向量; $\mathbf{r}(\boldsymbol{\theta})$ 为残差矩阵, 即 $\mathbf{r}(\boldsymbol{\theta}) = [r_1(\boldsymbol{\theta}), r_1(\boldsymbol{\theta}), \dots, r_n(\boldsymbol{\theta})]$; $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^{(k)})$ 为目标函数 $\lambda(\boldsymbol{\theta})$ 在 $\boldsymbol{\theta}^{(k)}$ 处的 Jacobi 矩阵, 即

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial r_n(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial r_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2} & \frac{\partial r_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial r_n(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_m} & \frac{\partial r_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_m} & \dots & \frac{\partial r_n(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_m} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中: m 为待估计参数数量, 本文中 m 为 5。

L-M 寻优算法的具体步骤如下:

步骤 1 令 $k=0$, 给定初值 $\theta^{(k)}$, 迭代精度 ε , 初始步长 $l^{(k)}$ 。

步骤 2 计算 $r(\theta^{(k)})$ 和 $J(\theta^{(k)})$, 令 $A=J(\theta^{(k)})^T$ 。
 $J(\theta^{(k)})$, $B=J(\theta^{(k)})^T r(\theta^{(k)})$ 。

步骤 3 计算 $\theta^{(k+1)}$ 及目标函数 $\lambda(\theta^{(k+1)})$ 的值。

步骤 4 如果 $\lambda(\theta^{(k+1)}) \leq \varepsilon$, 则最优解为 $\theta^{(k+1)}$, 迭代结束, 否则跳转到步骤 5。

步骤 5 如果 $\lambda(\theta^{(k+1)}) \geq \lambda(\theta^{(k)})$, 则改变步长, 令 $l^{(k)}=10l^{(k)}$, 跳转到步骤 6; 如果 $\lambda(\theta^{(k+1)}) < \lambda(\theta^{(k)})$, 则改变步长, 令 $l^{(k)}=0.1l^{(k)}$, 跳转到步骤 6。

步骤 6 令 $k=k+1$, 重复步骤 2。

根据近十余年中国民航鸟撞事件统计数据及上述参数估计方法, 鸟撞冲击能量数据的分布拟合结果如图 2 所示, 并与一般两参数威布尔分布拟合结果进行比较, 如图 2、表 1 和表 2 所示。

SSE 为拟合数据和原始数据的误差平方和, RMSE 为 SSE/n 的平方根, R^2 为拟合数据和原始数据的线性相关度指标。SSE 和 RMSE 的值越接近 0, 表明模型选择越合理, 拟合效果越佳; R^2 的取值在 0~1, 该值越接近 1, 表明该模型对数据的拟合效果越好, 数据预测也越精确。

综合所述, 两重两参数混合威布尔分布函数更适合中国的鸟撞冲击能量分布特征。以 e 表征鸟撞冲击能量, 则其累计概率分布函数形式为

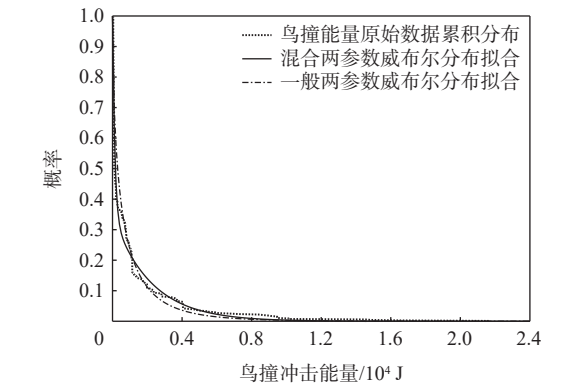


图 2 鸟撞冲击能量威布尔分布拟合
Fig. 2 Fitting of Weibull distribution of bird strike energy

Table 1 Parameter estimation values of two fitting distribution functions			
估计参数	p_1	η	β
两重两参数混合威布尔分布	0.346 4	2 204.685 2 (η_1)	1 (β_1)
		127.346 3 (η_2)	1 (β_2)
一般两参数威布尔分布		542.098 7	0.601 1

注: η_1 、 η_2 为 η 的两重参数; β_1 、 β_2 为 β 的两重参数。

Table 2 Comparison of goodness of fit of two fitting functions			
拟合优度评估指标	残差平方和SSE	均方差RMSE	判定系数 R^2
两重两参数混合威布尔分布	1.613 3	0.041 3	0.957 9
一般两参数威布尔分布	6.074 5	0.080 2	0.906 8

$$P(e)=0.346\,4\exp\left[-\left(\frac{e}{2\,204.685\,2}\right)^1\right]+0.653\,6\exp\left[-\left(\frac{e}{127.346\,3}\right)^1\right]\tag{20}$$

其物理意义是冲击能量大于 e 的概率为 $P(e)$ 。因此, 假定冲击能量处于 $[e_1, e_2]$ 区间内, 则其对应的概率值为

$$P(e_1 \leq e < e_2) = P(e_1) - P(e_2)\tag{21}$$

2 基于安全性目标的条款充分性评估

2.1 鸟击能量概率估算

CCAR 25.571^[4] 和 CCAR 25.631^[4] 规定, 参考国内外主流运输类飞机的速度 V_c , 选取 $V_c=180$ m/s 作为鸟撞速度, 以确定不同适航规章要求对应的鸟撞能量要求。因此, 1.8 kg(4 lb) 和 3.6 kg(8 lb) 抗鸟撞要求对应的可承受的冲击能量值分别为 $e_4=29\,393$ J 和 $e_8=58\,786$ J, 则鸟撞冲击能量大于 29 393 J 和大于 58 786 J 的概率风险分别为

$$P_4=P(e>e_4)=5.617\,4\times10^{-7}$$

$$P_8=P(e>e_8)=9.109\,5\times10^{-13}$$

飞机抗 1.8 kg 和 3.6 kg 鸟撞适航条款对应的冲击能量及其概率值如图 3 所示。

以 2015 年为例, 中国民航鸟击事件万架次率为 4.455, 假设运输类飞机每架次的平均飞行时间为 3 h, 则每架次飞机每飞行小时发生鸟击的概率为 $P_b=1.485\times10^{-4}$ 。当年发生鸟击部位的统计数

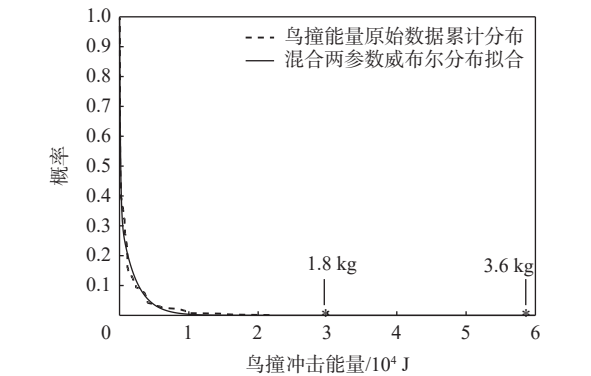


图 3 飞机抗鸟撞适航条款对应的冲击能量及其概率值
Fig. 3 Strike energy and its probability corresponding to airworthiness clause of aircraft against bird strike

据^[22]显示,机翼发生鸟击的次数占总体的比例为 14.94%,尾翼发生鸟击的次数占总体的比例为 2.33%,则每飞行小时机翼和尾翼发生鸟击的概率分别为

$$\begin{cases} P_b^w = 1.485 \times 10^{-4} \times 14.94\% = 2.2186 \times 10^{-5} \\ P_b^t = 1.485 \times 10^{-4} \times 2.33\% = 3.4601 \times 10^{-6} \end{cases}$$

因此,超过 1.8 kg 和 3.6 kg 质量的鸟体分别对机翼和尾翼的撞击能量风险为

$$\begin{cases} P_4^w = P(e > e_4) \times P_b^w = (5.6174 \times 10^{-7}) \times (2.2186 \times 10^{-5}) = 1.2463 \times 10^{-11} \\ P_8^t = P(e > e_8) \times P_b^t = (9.1095 \times 10^{-13}) \times (3.4601 \times 10^{-6}) = 3.1520 \times 10^{-18} \end{cases}$$

根据参考文献[23]中具有共识性的发生灾难性事故的目标概率为 10^{-9} 可知,在中国鸟情环境下,运输类飞机机翼遭遇 4 lb 鸟体撞击的概率满足安全风险目标,飞机尾翼遭受 8 lb 鸟体撞击的概率满足安全风险目标,即中国现行的飞机机翼和尾翼抗鸟撞适航条款是充分的,但尾翼抗鸟撞适航条款却过于保守。鉴于尾翼抗鸟撞适航条款过于保守的现状,对尾翼每飞行小时遭受 4 lb 鸟撞击的概率计算为

$$P_4^t = P(e > e_4) \times P_b^t = (5.6174 \times 10^{-7}) \times (3.4601 \times 10^{-6}) = 1.9435 \times 10^{-12}$$

上述计算结果表明,中国鸟情环境下飞机尾翼抗 3.6 kg 鸟体质量的适航条款也是充分且保守的。

鉴于参考文献[3]中对整架飞机每次飞行时遭遇超过 1.8 kg 鸟/海平面巡航速度撞击的能量和超过 3.6 kg 鸟/海平面巡航速度撞击的能量的概率分别为 10^{-7} 和 10^{-8} 的安全性目标,则每次飞行发生与 1.8 kg 和 3.6 kg 以上质量的鸟撞击概率分别为

$$\begin{cases} P_4^a = P(e > e_4) \times (P_b^w \times 3) = (5.6174 \times 10^{-7}) \times (4.455 \times 10^{-4}) = 2.5026 \times 10^{-10} << 10^{-7} \\ P_8^a = P(e > e_8) \times (P_b^t \times 3) = (9.1095 \times 10^{-13}) \times (4.455 \times 10^{-4}) = 4.0583 \times 10^{-16} << 10^{-8} \end{cases}$$

上述计算结果表明,中国鸟情环境下整架飞机每次飞行时抗 1.8 kg 鸟和 3.6 kg 鸟撞击的适航条款也是充分的,且抗 3.6 kg 鸟撞击的适航条款也是过于保守的。

2.2 FAA 的愿景验证

为验证 2.1 节研究方法和研究结果的可信性,以 FAA 网站上公布的国家野生动物撞击数据库(national wildlife strike database, NWSDB)中 2006—2019 年的鸟击事件信息为基础,挑选具有撞击速度记载值及明确鸟种的 1 万余条记录数据进行统计分析,得出鸟击能量概率分布大致服从对数正态分

布(位置参数为 5.843,比例参数为 1.367),如图 4 所示。

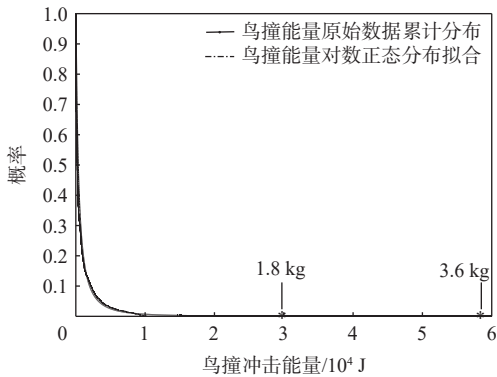


图 4 基于 FAA 鸟击能量分布的飞机适航条款相关的冲击能量及其概率值

Fig. 4 Strike energy and its probability related to aircraft airworthiness clause based on bird strike energy distribution of FAA

图 4 显示,1.8 kg 和 3.6 kg 的鸟以 180 m/s 的速度撞击后,大于相应撞击能量的概率分别为 5.8478×10^{-4} 和 8.7276×10^{-5} 。根据文献[24],以美国 2015 年为例(对应于中国 2015 年的运行数据),美国民航鸟击事件万架次率为 3.192,同样假设飞机每架次的平均飞行时间为 3 h,则每架次飞机每飞行小时发生鸟击的概率为 $P_b = 1.064 \times 10^{-4}$;同时,机翼和尾翼发生鸟击的次数占鸟击总数的比例分别为 14% 和 1%。因此,对机翼而言,1.8 kg 及以上质量的鸟体每飞行小时发生撞击机翼的概率为 $5.8478 \times 10^{-4} \times 1.064 \times 10^{-4} \times 0.14 = 8.7109 \times 10^{-9}$,大于灾难性事故安全目标 10^{-9} ;对尾翼而言,3.6 kg 及以上质量的鸟体每飞行小时发生撞击平尾或垂尾的概率为 $8.7276 \times 10^{-5} \times 1.064 \times 10^{-4} \times 0.01 = 9.2862 \times 10^{-11} \approx 10^{-10}$,小于灾难性事故安全目标 10^{-9} 。上述分析说明:机翼抗 1.8 kg 鸟体质量的适航条款要求已经无法满足北美地区发生灾难性鸟击风险的安全目标,存在较大的发生灾难性鸟击飞机事件的风险,这个结论与 FAA 提出的将飞机机翼抗鸟撞鸟体质量标准提升至 3.6 kg 具有趋同性;尾翼发生 3.6 kg 及以上质量的鸟体撞击的概率也体现了 FAA 继续提高尾翼抗鸟撞适航标准的意向。这从侧面反映了基于鸟撞冲击能量统计分布的研究方法和中国鸟环境下现行的飞机机翼抗鸟撞适航条款的充分性结论具有一定的可信性。同时,基于美国鸟情的飞机机翼抗 1.8 kg 鸟撞击的安全不充分性,对机翼每飞行小时遭受 3.6 kg 鸟撞击的概率计算为 $8.7276 \times 10^{-5} \times 1.064 \times 10^{-4} \times 14\% = 1.3001 \times 10^{-9}$ 。该结果表明,美国鸟情环境下飞机机翼抗 3.6 kg 鸟体质量的适航条款接近但仍超出发生灾难性事故的安全性目标,安全

风险裕度为负。

鉴于文献 [3] 中对整架飞机每次飞行时遭遇超过 1.8 kg 鸟/海平面巡航速度撞击的能量和超过 3.6 kg 鸟/海平面巡航速度撞击的能量的概率分别为 10^{-7} 和 10^{-8} 的安全性目标, 则每次飞行发生与 1.8 kg 和 3.6 kg 以上质量的鸟撞击概率分别为

$$\begin{cases} P_4^a = (5.847\,8 \times 10^{-4}) \times (1.064 \times 10^{-4} \times 3) = \\ \quad 1.866\,7 \times 10^{-7} > 10^{-7} \\ P_8^a = (8.727\,6 \times 10^{-5}) \times (1.064 \times 10^{-4} \times 3) = \\ \quad 2.785\,8 \times 10^{-8} > 10^{-8} \end{cases}$$

上述计算结果表明, 美国鸟情环境下整架飞机每次飞行时抗 1.8 kg 鸟和 3.6 kg 鸟撞击的适航条款是不充分的, 这也是美国局方近年来一直致力于推动和协调提高运输类飞机抗鸟撞适航认证标准的愿景。

3 基于安全性目标的条款适宜性评估

3.1 不同安全性目标下的鸟体质量确定

以 1×10^{-9} 为鸟撞安全性目标, 根据中国鸟击航空器能量概率分布函数、鸟击事件万架次率、机翼部位发生鸟击的频次比例等数据进行鸟体质量反推, 得到机翼结构对应的可承受的鸟体质量为 1.218 kg, 即从安全风险目标的角度考虑, 处于中国鸟情环境下的运输类飞机机翼的抗鸟撞要求中的鸟体质量需达到 1.218 kg, 这小于目前中国对民机机翼抗鸟撞适航要求中对鸟体的质量要求 (1.8 kg)。飞机机翼不同抗鸟撞结构设计所能承受的鸟体质量与风险值的对应关系如图 5 所示。

同理, 如以 10^{-9} 为尾翼抗鸟撞安全性目标 (不按平尾和垂尾分别计算) 对应的鸟体质量为 0.965 kg (约 2.13 lb), 即如果仅从上述安全风险目标考虑, 对处于中国鸟群环境下的运输类飞机尾翼的抗鸟撞鸟体质量要求只需达到 0.965 kg 即可。因此, 在中国鸟群环境下 CCAR 25.631^[4] 条款中对尾翼结构的抗鸟撞鸟体质量要求 (8 lb) 是非常保守的。

如以 10^{-10} 为尾翼抗鸟撞安全性目标, 反推得到的鸟体质量为 1.278 kg; 如以 10^{-11} 为尾翼抗鸟撞安全性目标, 反推得到的鸟体质量为 1.591 kg。飞机尾翼不同抗鸟撞结构设计所能承受的鸟体质量与风险值的对应关系如图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知, 中国鸟情环境下飞机机翼和尾翼结构不同抗鸟撞鸟体质量要求对应的安全风险水平; 根据可接受安全风险阈值, 可对对应得到运输类飞机机翼和尾翼结构设计需满足可承受的最大鸟体质量。这对飞机机翼和尾翼结构抗鸟撞设计及优化改进具有重要的参考价值。

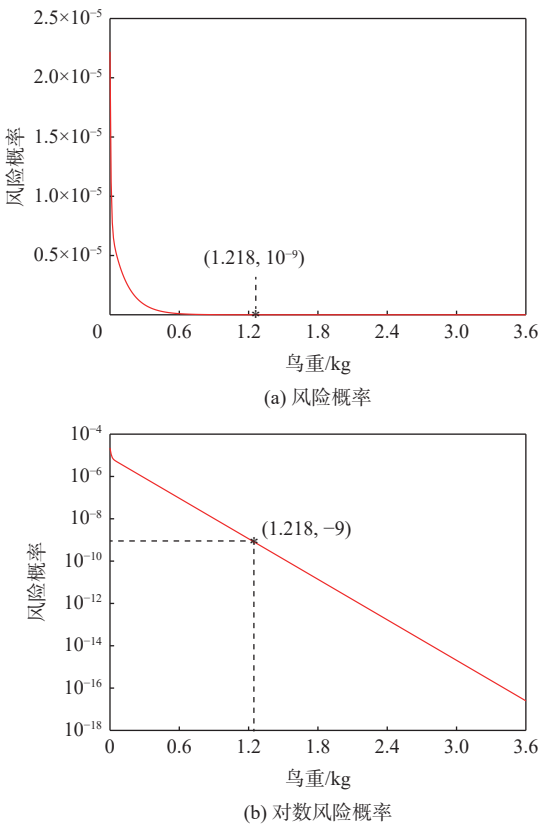


图 5 飞机机翼结构遭遇的鸟体质量与对应的风险概率
Fig. 5 Weight of bird affecting aircraft wing and corresponding risk

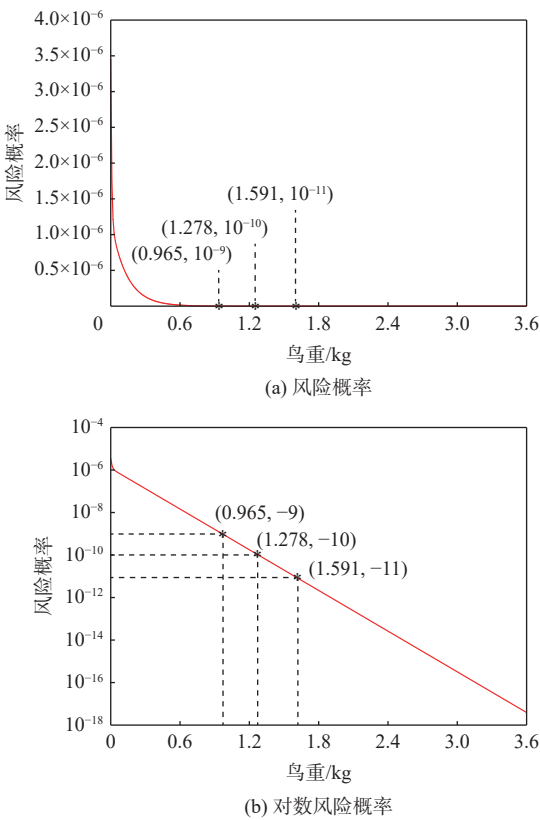


图 6 飞机尾翼结构遭遇的鸟体质量与对应的风险概率
Fig. 6 Weight of bird affecting aircraft tail and corresponding risk

3.2 FAA 愿景的进一步验证

以 FAA 网站上公布的 2006—2019 年的鸟击事件数据及其鸟击能量分布函数为基础,以 10^{-9} 为安全性目标,反推机翼应承受的抗鸟撞鸟体质量为 3.9 kg,大于目前规章要求的 4 lb(约 1.8 kg)鸟体质量,这也许正是从一个重要维度佐证了 FAA 近 20 年来一直在讨论将机翼抗鸟撞鸟体质量标准提高至 8 lb(约 3.6 kg)的证据之一^[3];同样,按此安全性目标,反推尾翼应承受的抗鸟撞鸟体质量应为 1.5 kg,小于目前规章要求的 8 lb(约 3.6 kg)。但由于在美国曾经仅出现过 1 次鸟击尾翼后机毁人亡的事故,故 FAA 暂时没有调整对尾翼的抗鸟撞鸟体质量标准。

4 结 论

本文提出一种基于两重两参数混合威布尔分布的鸟撞冲击能量统计分析方法,并通过对美国商用飞机鸟击数据的统计分析和 FAA 修订相关条款的部分愿景验证,证实本文方法的有效性,以及基于中国鸟情环境下的运输类飞机抗鸟撞适航条款的充分性和适宜性结果的一定可信性。

1) 应用 L-M 寻优算法对鸟撞冲击能量进行混和威布尔分布参数寻优估计,得到比一般两参数威布尔分布更加精确和有效的中国鸟撞冲击能量分布。

2) 对机翼而言,相关抗鸟撞适航条款具有充分性和适宜性;以 10^{-9} 为安全性目标,机翼结构对应的可承受鸟体质量为 1.218 kg。

3) 对尾翼而言,相关适航条款具有充分性但过于保守,可适当降低尾翼结构的抗鸟撞鸟体质量要求(如 1.8 kg,与 EASA 规定的飞机尾翼抗鸟撞鸟体质量要求一致)。

值得注意的是:对鸟情数据的统计分析和对鸟撞航空器冲击能量的风险评估,是保守确定鸟撞适航条款中鸟体质量要求的初始依据,也是持续更新鸟撞适航条款的客观事实。相较于美国鸟撞航空器信息收集的长期性、完善性和规范性,尽管中国民航鸟撞航空器信息还存在缺项较多、分类颗粒度粗犷等问题,也导致本文计算结果与实际情况还存在一定差异,但随着中国鸟情数据收集的不断丰富完善和对鸟撞案例统计分析的持续改进,相信可以得到更加精确的鸟情分布特征,为制定/修订适合中国鸟情环境的运输类飞机抗鸟撞适航要求提供可靠的决策依据。

致谢 感谢中国民航科学技术研究院提供的相关鸟撞航空器信息源,感谢中国民航上海航空

器适航审定中心提供的相关规章解读支持。

参考文献 (References)

[1] Federal Aviation Administration, Department of Transportation of U. S. . Part 25—Airworthiness standards: Transport category airplanes [S/OL] . Washington, D. C. : Federal Aviation Administration, (2024-05-01)[2024-05-23]. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2023-title14-vol1/pdf/CFR-2023-title14-vol1-part25.pdf>.

[2] European Aviation Safety Agency. Certification specifications and acceptable means of compliance for large aeroplanes CS-25: Amendment 19[S]. Brussels: European Aviation Safety Agency, 2017: 1-C-26-1-C-28+1-D-6.

[3] ANDREW H K. Submittal of results of harmonization effort on FAR/JAR §25.631, birdstrike: L350-03-114, version 2[R]. Washington, D. C. : Aviation Rulemaking Advisory Committee of FAA, 2003: 11-32.

[4] 中国民用航空局政策法规司. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2016: 69-71.
Policy and Regulation Department, Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards of transport category airplanes CCAR-25-R4 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016: 69-71(in Chinese).

[5] Federal Aviation Administration, Department of Transportation of U. S. . Bird strike requirements for transport category airplanes: FAA-2015-2490[S]. Washington D. C. : Federal Aviation Administration, 2015: 63877-63878.

[6] COLÓN M R, LONG A M. Strike hazard posed by columbids to military aircraft[J]. Human-Wildlife Interactions, 2018, 12(2): 198-211.

[7] PFEIFFER M B, BLACKWELL B F, DEVAULT T L, et al. Quantification of avian hazards to military aircraft and implications for wildlife management[J]. Public Library of Science One, 2018, 13(11): 1-16.

[8] 熊明兰, 王华伟, 徐怡, 等. 基于鸟击事故征候预测的通用航空安全研究[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(9): 2033-2040.
XIONG M L, WANG H W, XU Y, et al. General aviation safety research based on prediction of bird strike symptom[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(9): 2033-2040(in Chinese).

[9] 陈唯实, 万健, 李敬. 基于机场探鸟雷达数据的鸟击风险评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(11): 1431-1436.
CHEN W S, WAN J, LI J. Bird strike risk assessment with airport avian radar data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(11): 1431-1436(in Chinese).

[10] 郑江萍. 鸟击风险分布及风险评估研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014: 38-43.
ZHENG J P. Study on risk distribution and assessment of bird strike[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2014: 38-43 (in Chinese).

[11] 朱贝蓓, 蔡景. 基于 MCMC 方法的运输类飞机鸟撞冲击能量研究[J]. 航空计算技术, 2017, 47(1): 94-96.
ZHU B B, CAI J. Study on impact energy of bird strike of transport aircraft based on MCMC method[J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(1): 94-96(in Chinese).

[12] SARKHEIL H, TALAEIAN ERAGHI M, VATAN KHAH S. Haz-

ard identification and risk modeling on runway bird strikes at Sardar-e-Jangal International Airport of Iran[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2021, 7(4): 2589-2598.

[13] 陈琨, 解江, 裴惠, 等. 明胶鸟弹撞击复合材料蜂窝夹芯板试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2): 328-335.

CHEN K, XIE J, PEI H, et al. Experiment of composite honeycomb sandwich panels subjected to gelatin bird impact[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(2): 328-335(in Chinese).

[14] LONG S C, MU X L, LIU Y H, et al. Failure modeling of composite wing leading edge under bird strike[J]. Composite Structures, 2021, 255: 113005.

[15] 朱海龙. 民用飞机液压系统防鸟撞适航符合性评估[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(10): 67-70.

ZHU H L. CivilAircraft hydraulic system airworthiness compliance assessment for bird bird impact[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2021, 41(10): 67-70(in Chinese).

[16] KIM D H, KIM S W. Evaluation of bird strike-induced damages of helicopter composite fuel tank assembly based on fluid-structure interaction analysis[J]. Composite Structures, 2019, 210: 676-686.

[17] 顾晨轩, 苏艳, 王辉. 国内外运输类飞机鸟撞适航条款及其修订背景研究分析[J]. 科技创新导报, 2017, 14(7): 247-249.

GU C X, SU Y, WANG H. Research and analysis on airworthiness clause of bird impact of transport aircraft at home and abroad and its revision background[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, 14(7): 247-249(in Chinese).

[18] 罗刚, 张海洋, 吴春波, 等. 航空发动机吞鸟与鸟撞飞机适航通用分析方法[J]. 航空发动机, 2019, 45(6): 90-96.

LUO G, ZHANG H Y, WU C B, et al. General airworthiness analysis method of aeroengine bird ingestion and aircraft bird impact[J]. Aeroengine, 2019, 45(6): 90-96(in Chinese).

[19] SUZANNE M. Bird strike requirements for transport category airplane- compliance by analysis[R]. Washington, D. C. : FAA, 2016: 1-15.

[20] ASTM Subcommittee on Transparent Enclosures. Standard test method for bird impact testing of aerospace transparent enclosure: F330-21[S]. West Conshohochen: ASTM International, 2021: 1-5.

[21] 王立, 孙秀清, 张春明, 等. 一种全天时星跟踪器相对惯导的安装阵在线快速估计方法[J]. 航空学报, 2020, 41(8): 624117.

WANG L, SUN X Q, ZHANG C M, et al. Fast online estimation method for installing matrix between all-time star tracker and inertial navigation system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 624117(in Chinese).

[22] 中国民用航空局机场司和中国民航科学技术研究院. 2015 年度中国民航鸟击信息分析报告[R]. 北京: 中国民用航空局, 2015: 1-24.

Airport Department of Civil Aviation Administration of China and China Academy of Civil Aviation Science and Technology. Civil aviation bird strike aircraft information analysis report of civil aviation of China in 2015[R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2015: 1-24(in Chinese).

[23] Society of Automotive Engineers. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne system and equipment: ARP 4761[S]. Detroit: SAE International, 1996: 102-103.

[24] RICHARD A D, MICHAEL J B, PHYLLIS R M, et al. Wildlife strikes to civil aircraft in the United States, 1990–2019[R]. Washington D. C. : Federal Aviation AdministrationNational Wildlife Strike Database, 2021: 2-31 .

Adequacy and suitability of airworthiness clause of bird strike
based on bird situation in China

LU Xiaohua^{1,*}, CAI Jing¹, ZHANG Zhuguo², ZHANG Yingchun²

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Shanghai Aircraft Airworthiness Certification Center of CAAC, Shanghai 200335, China)

Abstract: Based on the data source of bird strike information of airplanes in transportation category from civil aviation of China in recent ten years, the mixed Weibull function was used to fit the bird strike energy distribution, and a Levenberg-Marquardt (L-M) optimization algorithm was applied to obtain more accurate estimations of fitted distribution parameters. Based on the safety index, it was sufficient and appropriate for the wing to evaluate the existing airworthiness clauses of bird strike by the bird strike energy distribution function. However, it was sufficient but too conservative for the tail. According to the safety index of catastrophic accidents, the minimum bird weight meeting the airworthiness requirement of the wing against bird strike under the bird situation in China was 1.218 kg. At the same time, the vision was verified that Federal Aviation Administration (FAA) would increase the minimum airworthiness requirement of the wing against bird strike to 3.6 kg under the bird situation in America, which partially demonstrated the validity of the methods and reliability of the results and provided a theoretical basis and practical reference for the independent revision of relevant airworthiness clauses of civil aviation of China.

Keywords: bird situation; airworthiness clause; bird strike energy distribution; evaluation; adequacy; suitability; safety index

Received: 2022-08-17; **Accepted:** 2022-11-04; **Published Online:** 2022-12-02 11:12
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221201.1457.002
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (U1933202); Safety Capacity Building Fund of CAAC (2021-198)
*** Corresponding author.** E-mail: luxiaohua@nuaa.edu.cn