

基于 Logistic 方法的鸟撞对飞行安全的影响分析

吴春波¹, 罗 刚¹, 陈 伟^{1,2}, 张海洋²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016; 2. 辽宁省航空发动机冲击动力学重点实验室, 沈阳 110015)

摘要:为了掌握鸟撞事件中各类因素对飞行安全影响的规律,采用无序多分类 Logistic 回归,对鸟撞事件中影响飞行的因素进行分析。数据来源为美国联邦航空局公开的 1990~2015 年飞机遭遇野生动物(主要为鸟)撞击的数据库。对数据库中的数据进行了简单的剔除和筛选,确定了包含 13 种影响因素、4 种对飞行产生的影响在内的 44837 条记录;将确定的 13 个影响因素作为回归变量,4 种影响作为响应变量。采用方差扩大因子法,借助 SAS 软件对回归变量进行多重共线性诊断。结果表明:回归变量间并无明显的共线性关系。应用 SAS 软件进行最大似然估计,进而对得到的参数估计结果进行分析;获得显著影响飞行的因素为鸟的数量及大小、飞行高度、飞行速度、飞机质量、发动机数量、季节、飞行阶段、日中时间、飞行员被警告与否。为航空公司和机场等相关单位的决策制定提供一定的指导。

关键词:飞机撞击;无序多分类 Logistic 回归; SAS 软件;飞行安全

中图分类号: V19

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.06.006

Influence Analysis of Bird Strike on Flight Safety Based on Logistic Method

WU Chun-bo¹, LUO Gang¹, CHEN Wei^{1,2}, ZHANG Hai-yang²

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Impact Dynamics on Aeroengine, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to understand the influence of various factors in bird strike events on flight safety, the multinomial Logistic Regression was used to analyze the factors affecting flight in bird strike events. The data came from the Federal Aviation Administration's database of aircraft strikes with wild animals (mostly birds) from 1990 to 2015. The data in the data-base were simply eliminated and screened, and 44837 records including 13 kinds of influencing factors and 4 kinds of influencing factors on flight were determined. The determined 13 influencing factors were taken as regression variables, and 4 kinds of influences were taken as response variables. The multicollinearity of regression variables was diagnosed by using SAS software with the method of variance inflation factor. The results show that there is no obvious collinear relationship among the regression variables. The maximum likelihood estimation is carried out by using SAS software, and then the parameter estimation results are analyzed. The factors that significantly affected flight were number and size of birds, flight altitude, flight speed, mass of aircraft, number of engines, season, flight stage, time of day, and whether the pilot had been warned. It provides certain guidance for airlines and airports and other related enterprises while making decision.

Key words: aircraft impact; multinomial logistic regression; SAS software; air safety

0 引言

鸟撞飞机或发动机极易导致飞行事故,不仅会造成巨大的经济损失,还严重威胁到旅客和空勤人员的生命安全^[1]。

欧洲航空安全局(European Aviation Safety Agency, EASA)统计分析了 1990~2007 年来自美国、加拿

大和英国的大约 11000 条鸟撞事件记录^[2];澳洲交通安全局(Australian Transport Safety Bureau, ATSB)统计分析了 2004~2013 年 14571 条野生动物撞机事件,其中绝大部分为鸟撞事件^[3]。EASA 和 ATSB 通过统计发现运输类飞机的鸟撞率最高,鸟撞事件中大鸟的数量有所增加。美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)曾统计了大量来自发动机生产

收稿日期:2019-09-10 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:吴春波(1994),男,在读硕士研究生,研究方向为冲击动力学及鸟撞统计;web@nuaa.edu.cn。

引用格式:吴春波,罗刚,陈伟,等. 基于 Logistic 方法的鸟撞对飞行安全的影响分析[J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 32-38. WU Chunbo, LUO Gang, CHEN Wei, et al. Influence analysis of bird strike on flight safety based on logistic method[J]. Aeroengine, 2021, 47(6): 32-38.

商、国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)和其他组织的发动机吸鸟数据,涉及大型涡扇发动机^[4-5]、大型高涵道比涡轮发动机^[6]和小进气面积发动机^[7],整合成数据库并形成分析报告。

Dolbeer^[8]采用简单负指数分布模型分析了1990~2004年美国鸟撞事件发生的高度分布,表明在0.15~6.25 km,每升高0.3 km,鸟撞率大约减小32%;74%的鸟撞事件和66%的由于鸟撞引发实质性损伤的事件发生在0.15 km以下;Zalakevicius^[9]分析了立陶宛1958~1978年以及1987~1991年的鸟撞数据,表明多数鸟撞事件发生在7月,最易发生鸟撞的飞行阶段是进近着陆阶段;Steele^[10]研究了1986~2000年影响墨尔本机场鸟撞发生率的因素,发现鸟类数量和活动情况是相当重要的因素;秋季是机场鸟数目最多的季节,8~12时是鸟撞发生率最高的时间段,鸟撞事件大多发生在低空。

中国的研究人员对鸟撞事故也开展了大量研究。20世纪80年代末,李其颖^[11]分析了鸟撞与月份、当日时间、飞行状态(飞行阶段和高度)、撞击部位之间的关系,表明每年4、5、9、10月是鸟撞高发期,白昼的事故数约占一天总事故数的70%,鸟撞事故多发生在机场附近300 m以下的低空,其中起飞和着陆阶段最多,飞机头部、座舱风挡、发动机、机翼前缘等位于飞机前部和凸起的部位最易与飞鸟相撞;陈成等^[12]采用定点观测法对河北北部机场鸟类群落和鸟类活动规律进行了调查,发现不同月份机场场区鸟类的物种数、数量和活动频率存在显著性差异,7月鸟类物种数量最多,10月鸟类数量和活动频率最高。

在对大量鸟撞事故进行统计、总结、研究、分析的基础上,欧美适航当局和中国民航局颁布了相应的适航规章,提出了抗鸟撞要求。此外,中国军用标准和航空标准也对飞机和发动机结构的防鸟撞设计提出了要求^[13]。西方航空国家的经验证明,对鸟撞历史数据进行统计分析,掌握鸟撞中各类因素对飞行安全影响的规律,开发不同鸟撞因素影响下飞行安全程度的预估方法,在适航符合性设计阶段及航空器抗冲击初始工程设计阶段十分必要。如PW公司在发动机设计初期会积累海量发动机鸟撞数据,为设计人员提供鸟的尺寸、飞行状态等参数,保障了该公司建立完善、有效的设计闭环来保证发动机抗鸟撞的能力^[14]。

本文基于FAA数据库,采用Logistic回归分析的

方法,分析了鸟撞事件中13种因素对飞行的影响。

1 Logistic 模型建立

1.1 数据描述

采用FAA公开的1990~2015年飞机遭遇野生动物撞击的数据,包括飞机的型号、类别、质量等几十项信息,总计17多万条记录。本文采用Logistic回归分析了飞行高度、速度、飞机质量、发动机数量、撞击前飞行员是否被提醒、飞行阶段、云量、鸟数目、鸟的尺寸、昼夜情况、季节、是否有雾、降水物这13种因素对飞行的影响,对飞行的影响分为终止起飞、发动机停车、预警性着陆和无影响4种,排除数据中非鸟撞、有缺失的记录和对飞行影响无关的记录,最终得到44837条记录。本文即针对这13种影响因素和4种对飞行产生的影响进行分析。

1.2 模型介绍

Logistic回归适用于2分类和多分类响应变量的回归分析,用于分析的自变量既可以是连续的,也可以是离散的^[15]。陆莹等^[16]运用2分类Logistic回归模型分析卫生服务供方可及性对农村居民健康状况的影响;常青等^[17]采用多分类无序逻辑回归模型研究了11个变量对农村劳动力就业模式选择的影响;罗俊峰^[18]采用无序多分类Logistic模型研究人力资本对农民工职业选择的影响,发现影响农民工从事管理类、专业技术类等职业的因素。

通过Logistic回归分析,可以得到自变量的回归系数。考虑包含 n 个独立变量的向量 $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,设条件概率 $P(y = 1 | x) = p$ 为在取值为 x 的情况下 y 发生的概率。则Logistic回归模型的形式可表示为

$$P(y = 1 | x) = 1 / \{1 + \exp[-g(x)]\} = \pi(x) \quad (1)$$

式中: $\pi(x)$ 称为Logistic函数; $g(x) = \beta_0 + \sum x_i \beta_i$ 。

在同样条件下, y 不发生的概率为

$$P(y = 0 | x) = 1 / \{1 + \exp[g(x)]\} \quad (2)$$

定义 y 发生与不发生的概率之比为式(1)与式(2)的比值

$$\begin{aligned} p / (1 - p) &= \frac{1 + \exp[g(x)]}{1 + \exp[-g(x)]} = \\ &= \frac{\{1 + \exp[g(x)]\} \times \exp[g(x)]}{\{1 + \exp[-g(x)]\} \times \exp[g(x)]} = \\ &= \frac{\{1 + \exp[g(x)]\} \times \exp[g(x)]}{1 + \exp[g(x)]} = \\ &= \exp[g(x)] \end{aligned} \quad (3)$$

这个比值称为发生比(odds)或优比。对发生比取对数即可得

$$\ln [p/(1-p)] = \beta_0 + \sum x_i \beta_i \quad (4)$$

这一转换称为logit形式,也称对数发生比或 y 的logit。模型中的参数 β 可以按照线性回归系数那样进行解释。

在Logistic回归的参数估计方法中,极大似然法最常用。假设有 n 个观测作为样本,观测值分别为 $y_1, y_2, \dots, y_n, y_i$ 的取值为0或1。在给定的自变量的条件下, y_i 取值为1的概率记为 p_i ,取值为0的概率记为 $1 - p_i$,则得到第 i 个观测值(即 y_i 取值为1)的概率为

$$P(y_i) = p_i^{y_i} (1 - p_i)^{1 - y_i} \quad (5)$$

因为各项观测相互独立,所以其联合概率分布可以表示为各边缘分布的乘积

$$L(\theta) = \prod p_i^{y_i} (1 - p_i)^{1 - y_i} \quad (6)$$

式(6)称为 n 个观测的似然函数,将式(1)代入式(6),通过最大似然估计即可求得给定样本观测数据的参数估计,即 β 的值。

在响应变量是多分类的情况下,要引入多分类Logistic回归的概念,多分类Logistic回归依据响应变量是否有序,可分为有序多分类回归和无序多分类回归,本文采用无序多分类回归。

在无序多分类Logistic回归中,假设有 J 个响应类别, x 为解释变量,设 $\pi_j = P(y = j|x)$,有 $\sum \pi_j = 1$ 。

选择1个响应水平为参考,可建立 $J - 1$ 个logit模型,有 $J - 1$ 组参数估计^[19]

$$\ln \{ \pi_j(x) / \pi_1(x) \} = \beta_{j0} + \sum \beta_{ji} x_i \quad (7)$$

式中: $j = 1, \dots, J - 1$ 。

2 无序多分类Logistic回归分析

2.1 回归变量信息与分类变量

本文所分析的13个回归变量信息见表1。在13个回归变量中除了飞行高度和速度为连续变量,其余11个变量皆为离散变量。其中,需将离散的分类变量设置为虚拟变量,分类信息见表2。本文将响应变量“无影响”设置为参考组,进行无序多分类Logistic回归分析。

表1 回归变量信息

变量	水平	百分比/%	变量	水平	百分比/%
P_a (Altitude)	0 ~ 1524 m	96.1	P_{sp} (Speed)	0 ~ 100 kn	18.3
	1524 ~ 3048 m	3.3		100 ~ 200 kn	72.1
	4572 ~ 6706 m	0.6		200 ~ 380 kn	9.6
P_m (Mass)	≤2250 kg	7.6	P_{en} (Engine Number)	1	7.8
	2251 ~ 5700 kg	8.3		2	86
	5701 ~ 27000 kg	19.4		3	4.6
	27001 ~ 272000 kg	63.8		4	1.6
	>272000 kg	0.9	P_{ph} (Phase)	爬升/起飞滑行	33.9
P_w (Warned)	否	64.2		降落/进近/着陆	62.7
	是	35.8		巡航	3.4
P_{sk} (Sky)	无云	48.6		1	82.9
	有些许云		P_{bn} (Bird Number)	2 ~ 10	15.9
	多云/阴天	51.4		11 ~ 100	1.1
P_{bs} (Bird Size)	小鸟	62.3		>100	0.04
	中鸟	29.4	P_d (Daylight)	白天	62.1
	大鸟	8.3		晚上	29.3
P_{se} (Season)	冬	11.7		黎明/黄昏	8.6
	春	23	P_f (Fog)	否	97.4
	夏	31.8		是	2.6
	秋	33.5			
P_{pr} (Precipitation)	否	93.9			
	是	6.1			

表 2 分类变量信息

变量	变量描述	水平	虚拟变量
P_{fe} (FLIGHT_EFFECT)	对飞行的影响	0=中止起飞,1=发动机停车,2=预警性着陆,3=无影响	$F_1=1$, FLIGHT_EFFECT=1; 0: 其他 $F_2=1$, FLIGHT_EFFECT=2; 0: 其他 $F_3=1$, FLIGHT_EFFECT=3; 0: 其他
P_{bs} (Bird Size)	鸟的大小	0=小,1=中,2=大	$B_1=1$, BIRDSIZE=1; 0: 其他 $B_2=1$, BIRDSIZE=2; 0: 其他
P_{bn} (Bird Number)	鸟的数量	0=1 只,1=2-10 只,2=11-100 只,3=超过 100 只	$C_1=1$, BIRD_NUM=1; 0: 其他 $C_2=1$, BIRD_NUM=2; 0: 其他 $C_3=1$, BIRD_NUM=3; 0: 其他
P_d (Daylight)	光照条件	0=白天,1=晚上,2=黎明/黄昏	$D_1=1$, DAYLIGHT=1; 0: 其他 $D_2=1$, DAYLIGHT=2; 0: 其他
P_f (Fog)	是否有雾	0=否,1=是	FOG $M_1=1$, MASS=1; 0: 其他
P_m (Mass)	飞机质量	0=低于 2250 kg, 1=2251 ~ 5700 kg, 2=5701 ~ 27000 kg, 3=27001 ~ 272000 kg, 4=超过 272000 kg	$M_2=1$, MASS=2; 0: 其他 $M_3=1$, MASS=3; 0: 其他 $M_4=1$, MASS=4; 0: 其他
P_{en} (Engine Number)	发动机数	0=1 个,1=2 个,2=3 个,3=4 个	$E_1=1$, ENG_NUM=1; 0: 其他 $E_2=1$, ENG_NUM=2; 0: 其他 $E_3=1$, ENG_NUM=3; 0: 其他
P_{ph} (Phase)	飞行阶段	0=爬升/起飞滑行,1=降落/进近/着陆,2=巡航	$P_1=1$, PHASE=1; 0: 其他 $P_2=1$, PHASE=2; 0: 其他
P_{pr} (Precipitation)	是否有降水物	0=否,1=雨/雪	P_{pr} $S_1=1$, SEASON=1; 0: 其他
P_{sc} (Season)	季节	0=冬,1=春,2=夏,3=秋	$S_2=1$, SEASON=2; 0: 其他 $S_3=1$, SEASON=3; 0: 其他
P_{sk} (Sky)	是否有云	0=否,1=是	P_{sk}
P_w (Warned)	飞行员是否被警告	0=否,1=是	P_w

2.2 多重共线性诊断

在 Logistic 回归中,要求变量之间相互独立,若变量相互之间存在一定程度的线性关系,则称之为存在多重共线性。对于解释变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 如果存在

$$c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n = 0 \tag{8}$$

式中: c_i 不全为 0,即某一变量可用其他变量线性组合表示,则称解释变量之间存在完全共线性。若存在

$$c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n + v = 0 \tag{9}$$

式中: c_i 不全为 0; v 为随机干扰项,则称为近似共线性或交互相关^[20]。

若变量间存在多重共线性,会增大参数估计值的均方误差和标准误,甚至会得到符号相反的回归系数,从而导致方程极不稳定,进而导致 Logistic 回归模型拟合出现矛盾及不合理^[21]。多重共线性的诊断方法有简单相关系数检验法、方差扩大因子法、特征值和病态指数法等多种。本文采用方差扩大因子法进

行多重共线性诊断。方差扩大因子 (Variance Inflation Factor, VIF) 计算式为

$$V = 1/(1 - R_i^2) \tag{10}$$

式中: V 为方差扩大因子, R_i 为以自变量 X_i 为因变量时,对其它自变量进行回归的复相关系数。

一般认为,当 $0 < V < 10$ 时,自变量不存在多重共线性;当 $10 \leq V < 100$ 时,存在较强的多重共线性;当 $V \geq 100$,存在严重多重共线性,此时可采用主成分分析法来改善 Logistic 回归^[22]。

本文应用 SAS 软件计算得到的方差扩大因子见表 3。从表中可见,回归变量间并无明显的共线性关系。

2.3 参数估计

本文借助 SAS 软件对参数进行最大似然估计。由于本文将响应变量“无影响”设置为参考组,分析得到的响应变量为“中止起飞”、“发动机停车”、“预警性

表 3 共线性诊断

变量	参数估计	标准误	<i>t</i>	$P_{ t >1}$	<i>V</i>
$P_{Intercept}$	2.25773	0.01142	197.69	<0.0001	0
P_a	-0.00003885	0.0000018	-21.63	<0.0001	2.32565
P_{sp}	0.0027	0.00008109	33.24	<0.0001	2.72475
P_m	0.07931	0.00311	25.52	<.0001	1.84638
P_{en}	-0.02289	0.00611	-3.75	0.0002	1.49077
P_w	-0.00625	0.00457	-1.37	0.1711	1.03813
P_{ph}	0.24531	0.00421	58.28	<0.0001	1.0702
P_{sk}	0.01166	0.00454	2.57	0.0101	1.11385
P_{bn}	-0.10165	0.00522	-19.48	<0.0001	1.02459
P_{bs}	-0.10364	0.00344	-30.13	<0.0001	1.05967
P_d	-0.00384	0.00342	-1.12	0.2615	1.06326
P_{se}	-0.00147	0.00215	-0.68	0.4955	1.02027
P_f	-0.00963	0.01371	-0.7	0.4821	1.02747
P_{pr}	-0.00498	0.00936	-0.53	0.5949	1.07851

着陆”相对于参考组的参数估计见表 4~6。表中已删去 $P>0.05$ 的变量,下面对表中的结果进行简要分析。

产生“中止起飞”影响时的参数估计见表 4。从表中可见,变量 C_2 、 C_3 及 B_2 的系数较大,说明当遭遇的鸟的数量达到 100 只及以上、鸟的尺寸为“大”时产生

“中断起飞”影响的概率分别为无影响的 27.88 和 8.603 倍。

产生“发动机停车”影响时的参数估计见表 5。从表中可见,变量 E_3 、 C_2 、 B_1 和 B_2 的系数较大,说明当飞机为 4 发时、遭遇的鸟的数量为 2~100 只、鸟的尺寸为“大”时,产生“发动机关闭”影响的概率分别为无影响的 9.285、15.394 和 27.796 倍。

产生“预警性着陆”影响时的参数估计见表 6。从表中可见,变量 C_2 、 C_3 和 B_2 的系数较大,说明当遭遇的鸟的数量达到 100 只及以上、鸟的尺寸为“大”时产生“预警性着陆”影响的概率分别为无影响的 10.694 和 6.779 倍。

总得来说,表 4~6 中鸟的数量及大小相关的变量都是显著的($P<0.05$)。从表 4 中可见,变量 C_3 的优比为 27.880,即当飞机遭遇 100 只及以上的鸟时,飞机更倾向于中止起飞;从表 5 中可见,变量 B_2 的优比为 27.796,说明当遭遇的鸟的尺寸为“Large”时,发动机停车的概率相当大。根据上述分析可知,鸟的数量及大小显著影响着飞行。

表 4 参数估计(中止起飞)

变量		飞行影响	系数估计	标准误	Wald统计量	<i>P</i>	优比	95% Wald 置信区间	
$P_{Intercept}$		0	2.461	0.213	133.418	<0.0001			
P_a		0	−0.198	0.021	91.975	<0.0001	0.820	0.787	0.854
P_{sp}		0	−0.043	0.002	485.589	<0.0001	0.958	0.954	0.961
P_m	M_3	0	−0.832	0.240	12.058	0.0005	0.435	0.272	0.696
P_{en}	E_3	0	1.160	0.438	7.013	0.0081	3.190	1.352	7.526
P_{sk}	P_{sk}	0	−0.225	0.090	6.198	0.0128	0.799	0.669	0.953
P_{bn}	C_1	0	1.150	0.095	146.874	<0.0001	3.157	2.621	3.802
P_{bn}	C_2	0	2.287	0.262	76.300	<0.0001	9.841	5.892	16.440
P_{bn}	C_3	0	3.328	1.149	8.390	0.0038	27.880	2.933	265.012
P_{bs}	B_1	0	1.334	0.094	200.389	<0.0001	3.796	3.156	4.566
P_{bs}	B_2	0	2.152	0.149	208.923	<0.0001	8.603	6.426	11.518
P_{se}	S_2	0	−0.354	0.137	6.686	0.0097	0.702	0.537	0.918

表 5 参数估计(发动机停车)

变量		飞行影响	系数估计	标准误	Wald统计量	<i>P</i>	优比	95% Wald置信区间	
$P_{Intercept}$		1	-6.430	0.627	105.147	<0.0001			
P_{en}	E_3	1	2.228	0.803	7.706	0.0055	9.285	1.925	44.783
P_{ph}	P_1	1	-2.148	0.252	72.404	<0.0001	0.117	0.071	0.191
P_{ph}	P_2	1	-2.407	1.037	5.386	0.0203	0.090	0.012	0.688
P_{bn}	C_1	1	0.834	0.237	12.327	0.0004	2.301	1.445	3.665
P_{bn}	C_2	1	2.734	0.459	35.423	<0.0001	15.394	6.257	37.878
P_{bs}	B_1	1	2.422	0.318	58.002	<0.0001	11.265	6.040	21.007
P_{bs}	B_2	1	3.325	0.350	90.075	<0.0001	27.796	13.988	55.229
P_d	D_2	1	0.733	0.268	7.472	0.0063	2.080	1.230	3.517

表 6 参数估计(预警性着陆)

变量		飞行影响	系数估计	标准误	Wald 统计量	P	优比	95% Wald 置信区间
$P_{Intercept}$		2	-0.996	0.111	81.327	<0.0001		
P_a		2	0.000	0.000	6.845	0.0089	1.000	1.000
P_{sp}		2	0.005	0.001	37.139	<0.0001	1.005	1.003
P_m	M_2	2	-1.135	0.111	105.567	<0.0001	0.321	0.259
P_m	M_3	2	-2.014	0.109	342.235	<0.0001	0.133	0.108
P_m	M_4	2	-2.558	0.358	51.182	<0.0001	0.077	0.038
P_{en}	E_1	2	-0.964	0.097	98.353	<0.0001	0.382	0.315
P_{en}	E_2	2	-1.621	0.197	67.839	<0.0001	0.198	0.134
P_w	P_w	2	0.185	0.049	14.080	0.0002	1.203	1.092
P_{ph}	P_1	2	-2.773	0.064	1882.599	<0.0001	0.062	0.055
P_{ph}	P_2	2	-0.405	0.082	24.498	<0.0001	0.667	0.568
P_{bn}	C_1	2	0.748	0.058	168.520	<0.0001	2.112	1.886
P_{bn}	C_2	2	2.136	0.144	219.686	<0.0001	8.469	6.384
P_{bn}	C_3	2	2.370	0.709	11.176	0.0008	10.694	2.666
P_{bs}	B_1	2	1.006	0.052	375.331	<0.0001	2.735	2.470
P_{bs}	B_2	2	1.914	0.066	845.516	<0.0001	6.779	5.958
P_d	D_1	2	0.161	0.059	7.437	0.0064	1.174	1.046
P_{se}	S_2	2	-0.272	0.074	13.531	0.0002	0.762	0.659

此外,从表 4~6 中还可见,飞行高度(ALTITUDE)、速度(SPEED)和飞机质量(MASS)对于中止起飞和预警性着陆是显著的。表 4、5 中变量 E_3 分别为 3.190 和 9.285,说明发动机是否为 4 发对于中止起飞和发动机停车有显著影响。相比而言,当发动机为 4 发时,飞机更倾向于发动机停车。是否为夏季对中止起飞和预警性着陆显著。表 4 和表 6 中变量 S_2 皆小于 1,相较中止起飞和预警性着陆而言,在夏季飞机遭遇鸟撞后,对飞行无影响的概率略高。在飞行阶段、日中时间对于发动机停车和预警性着陆有显著影响,当飞机处于进近、着陆下降阶段时,显然不会产生预警性着陆和中止起飞的影响,故变量 P_1 优比近似为零;当飞机处于巡航阶段, P_2 优比很小,说明在巡航阶段对飞机产生无影响的概率更高。表 5 中变量 $D_2=2.08$,说明在清晨或黄昏时,飞机发动机停车概率更高;表 6 中变量 $D_1=1.174$,说明晚上飞机更倾向于预警性着陆。表 6 中变量 P_w 为 1.203,说明当飞行员被警告,飞机预警性着陆的概率更高。

变量 P_{sk} 、 P_f 和 P_{pr} 属于天气因素,其中 P_f 和 P_{pr} 在表 4~6 中皆不显著;在表 5 中 $P_{sk}=0.799$,说明天空有云时飞机遭遇鸟撞产生无影响的概率稍高。

2.4 分析结果对适航设计与飞行管理的意义

第 2.3 节分析了与鸟撞有关的 13 个因素对飞行状态与飞行安全的影响,上述分析结果对适航符合性设计及飞行管理具有较大的指导意义。分析可得,在

发生鸟撞时,鸟的大小和数量显著影响着飞行安全。因此,一方面,在飞行器或发动机设计初始阶段开展适航符合性设计时,必须针对不同质量和不同数量的鸟对飞行器的撞击及其影响开展相应的分析、研究和评估,设计提升飞行器或发动机的抗鸟撞能力;另一方面,对于飞行管理部门而言,必须采取措施降低机场及周边特定质量或特定生活习性如集群鸟类的威胁,如改变机场周边生境、采取有效的驱鸟措施等。在发动机数量方面,4 发飞机遭遇鸟撞时中止起飞和发动机停车的概率较高,这会对飞行安全及机场运行秩序造成严重影响,因此 4 发飞机及其发动机在设计时必须全面考虑抗鸟撞能力;此外,航空公司和机场在运营 4 发重型机时,要特别考虑起飞、爬升、进近、着陆阶段的驱鸟防鸟措施。在飞行员受警告方面,必须掌握提前预警技术,以尽可能提早为飞行员的判断提供协助。

3 结论

- (1)鸟的数量和大小显著影响着飞行;
- (2)飞机是否有 4 台发动机对于中止起飞和发动机停车有显著影响,当飞机为 4 发时更倾向于发动机停车;
- (3)在夏季,中止起飞和预警性着陆的概率分别为无影响的 0.702 和 0.762 倍;
- (4)在巡航阶段,发动机停车和预警性着陆的概

率分别为无影响的0.090和0.667倍;

(5)在清晨或黄昏时,发动机停车的概率为无影响的2.08倍,晚上飞机预警性着陆的概率为无影响的1.174倍;

(6)当飞行员被警告,飞机预警性着陆的概率为无影响的1.203倍;

(7)天气因素(包括是否有云、降水和雾)对飞行影响不大。

参考文献:

- [1] 李玉龙,石霄鹏.民用飞机鸟撞研究现状[J].航空学报,2012,33(2):189-198.
LI Yulong, SHI Xiaopeng. Investigation of the present status of research on bird impacting on commercial airplanes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(2): 189-198. (in Chinese)
- [2] Dennis N, Lyle D. Bird strike damage & windshield bird strike [R]. 5078609-rep-03, Brussels: European Aviation Safety Agency, 2008.
- [3] ATSB. Australian aviation wildlife strike statistics 2004 to 2013[R]. Aviation Research Statistic (AR-2014-075), Canberra: Australian Transport Safety Bureau, 2014.
- [4] Banilower H, Goodall C. Bird ingestion into large turbofan engines[R]. DOT/FAA/CT-91/17, Atlantic: FAA Technical Center, 1992.
- [5] Banilower H, Goodall C. Bird ingestion into large turbofan engines 2 [R]. DOT/FAA/CT-93/14, Atlantic: FAA Technical Center, 1995.
- [6] Frings G. A study of bird ingestions into large high bypass ratio turbine aircraft engines[R]. DOT/FAA/CT-84/13, Atlantic: FAA Technical Center, 1984.
- [7] Martino J P, Skinn D A, Wilson J J. Study of bird ingestions into small inlet area aircraft[R]. DOT/FAA/CT-90/13, Atlantic: FAA Technical Center, 1990.
- [8] Dolbeer R A. Height distribution of birds recorded by collisions with civil aircraft[J]. USDA National Wildlife Research Center - Staff Publications, 2006(70):1345-1350.
- [9] Zalakevicius M. Bird strike analysis in lithuania[J]. Acta Ornithologica Lituanica, 1994, 9-10: 87-90.
- [10] Steele W K. Factors influencing the incidence of bird-strikes at Melbourne airport, 1986-2000[C]//Bird Strike Committee-USA/Canada. Third Joint Annual Meeting. Calgary: DigitalCommons@University of Nebraska- Lincoln, 2001:144-157.
- [11] 李其颖.鸟撞飞机的一般规律和防撞措施[J].航空学报,1988,9(8):383-386.
LI Qiyang. The general rules and anti-collision measures of birds strike on aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(8):383-386. (in Chinese)
- [12] 陈成,侯建华.机场鸟类群落与活动规律研究[J].河北农业大学学报,2013,36(3):92-97.
CHEN Cheng, HOU Jianhua. The composition and activity routines of birds at airports of Hebei province[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2013, 36(3): 92-97. (in Chinese)
- [13] 金镭,刘友丹.运输类飞机鸟撞适航性技术研究[J].航空标准化与质量,2012(6):11-15.
JIN Lei, LIU Youdan. Study on airworthiness of bird impact in transport aircraft[J]. Aeronautic Standardization Quality, 2012(6): 11-15. (in Chinese)
- [14] 岳宁,王春生.关于航空发动机吸鸟适航条例的变化与思考[J].国际航空,2010(5):77-79.
YUE Ning, WANG Chunsheng. Changes and thoughts on airworthiness regulations of aircraft engines sucking birds[J]. International Aviation, 2010(5): 77-79. (in Chinese)
- [15] 吴振强,王杨,李卫.采用Logistic回归分析时需注意的问题[J].中国循环杂志,2014(3):230-231.
WU Zhenqiang, WANG Yang, LI Wei. Problems to be paid attention to when using Logistic regression analysis[J]. Chinese Circulation Journal, 2014(3): 230-231. (in Chinese)
- [16] 陆莹.卫生服务供方可及性对农村居民健康影响的实证分析——基于二分类Logistic回归模型[J].保定学院学报,2019,32(3):33-38.
LU Ying. An empirical analysis of the impact of health service provider accessibility on rural residents' health -- based on binary Logistic regression model[J]. Journal of Baoding University, 2019, 32(3): 33-38. (in Chinese)
- [17] 常青青,刘平辉.农村劳动力就业模式选择的影响因素研究——基于无序多分类Logistic回归模型分析[J].东华理工大学学报(社会科学版),2015,34(4):321-326.
CHANG Qingqing, LIU Pinghui. Study on influencing factors of rural labor employment mode selection -- based on disordered multiple classification Logistic regression model analysis[J]. Journal of East China Institute of Technology (Social Science), 2015, 34(4): 321-326. (in Chinese)
- [18] 罗俊峰.农民工职业选择的人力资本约束研究——基于无序多分类Logistic模型分析[J].调研世界,2014(6):41-44.
LUO Junfeng. Study on human capital constraint of migrant workers' career choice -- based on disordered multi-classification Logistic model[J]. The World of Survey and Research, 2014(6): 41-44. (in Chinese)
- [19] 李丽霞,郜艳晖,周舒冬,等.二分类、多分类Logistic回归模型SAS程序实现的探讨[J].数理医药学杂志,2007(4):431-434.
LI Lixia, GAO Yanhui, ZHOU Shudong, et al. Discussion on realization of binary and multiple classification Logistic regression model SAS program[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2007(4): 431-434. (in Chinese)
- [20] 李子奈,潘文卿.计量经济学[M].3版.北京:高等教育出版社,2010:138-140.
LI Zinai, PAN Wenqing. Econometrics[M]. 3th ed. Beijing: Higher Education Press, 2010:138-140. (in Chinese)
- [21] 陶然. Logistic模型多重共线性问题的诊断及改进[J].统计与决策,2008(15):22-25.
TAO Ran. Diagnosis and improvement of multi-collinearity in Logistic model[J]. Statistics and Decision, 2008(15): 22-25. (in Chinese)
- [22] 苏齐鉴,臧宁,肖信,等.主成分Logistic回归模型在消除数据多重共线性中的应用[J].中国卫生统计,2009(2):206-208.
SU Qijian, ZANG Ning, XIAO Xin, et al. Application of principal component Logistic regression model in eliminating data multi-collinearity[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2009(2): 206-208. (in Chinese)

(编辑:程海)