

文章编号:1674-8190(2021)04-052-07

一种适用于进近尾流间隔缩减的机型聚类方法

张竞予,桑保华,田勇

(南京航空航天大学 民航学院,南京 211100)

摘要: 目前,我国广泛使用的尾流间隔标准过于保守,导致机场跑道容量受限。以进近航空器的尾流遭遇问题为研究对象,首先研究进近尾流安全间隔缩减方法,获取缩减后的临界尾流间隔;然后基于主成分分析法(PCA)对BADA数据库中的航空器性能数据降维,提出一种适用于进近尾流间隔缩减的机型层次聚类方法;最后采用该方法得到新的机型分类结果并构建缩减后的尾流安全间隔标准。结果表明:本文所使用的机型层次聚类方法与国内外航空器分类方法具有较好的一致性,在长沙黄花国际机场的主流配对机型间,所获取的进近航空器尾流间隔标准与传统尾流间隔标准相比可以缩减0.8 km以上。

关键词: 进近尾流;航空器分类;层次聚类;主成分分析法;安全间隔

中图分类号: V328; V355

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.04.06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Model Clustering Method Suitable for Approach Wake Separation Reduction

ZHANG Jingyu, SANG Baohua, TIAN Yong

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: At present, the standard of wake separation widely used in China is too conservative, which leads to the limitation of runway capacity. This article takes the approach aircraft wake encounter problem as the research object. On the one hand, it studies the approach wake safety separation reduction method to obtain the reduced critical wake separation. On the other hand, based on the PCA (Principal Component Analysis) method to reduce the dimensionality of the aircraft performance data in the BADA database, a model hierarchical clustering method suitable for approach wake separation reduction is proposed. According to this method, new model classification results are obtained and reduced wake safety separation standards are constructed. The simulation results show that the model classification method used in this paper has good consistency with the mainstream classification methods at home and abroad, among the mainstream paired aircraft types at Changsha Huanghua International Airport, the approach wake separation standard obtained in this paper can be reduced by more than 0.8 km compared with the traditional wake separation standard.

Key words: approach wakes; aircraft type; aggregative cluster; PCA; safety separation

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2020-11-26

基金项目: 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20190721)

通信作者: 桑保华, sangbaohua@nuaa.edu.cn

引用格式: 张竞予,桑保华,田勇. 一种适用于进近尾流间隔缩减的机型聚类方法[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 52-58.

ZHANG Jingyu, SANG Baohua, TIAN Yong. A model clustering method suitable for approach wake separation reduction[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 52-58. (in Chinese)

0 引言

机场的通行效率在很大程度上依赖于空管的运行控制能力和航空器之间的安全间隔,而我国各大机场仍然采用较为保守的尾流间隔标准,没有最大化地释放跑道容量。例如,国内近距平行跑道机场尚未推广使用配对进近或配对离场,而是以隔离运行模式为主,一条跑道仅用于连续进近,另一条跑道用于起飞离场,其安全间隔参照单跑道的间隔标准实施航空器管制,保留了较大的安全裕度。在保证安全的前提下改进现行的尾流安全间隔,有利于解决民航运输的供需矛盾,因此,国内外对尾流间隔的合理性展开了深入研究,主要成果有:NASA提出航空器尾流间隔系统(Aircraft Vortex Spacing System,简称AVOSS),可以预测出动态变化的尾流间隔,实际使用情况表明,该系统能够将拉斯沃思机场跑道容量提升6%左右^[1];L. M. B. C. Campos等^[2]于2016年提出了关于前机的尾流湍流对后机滚转稳定性影响理论,从而得出安全间隔距离的公式,可用于直接计算纵向间隔,是一种较为精准的研究手段,但是对所需气象数据要求较高;魏志强等^[3]用统计分析的方法建立了基于风速的动态尾流间隔计算模型,该模型对安全间隔的缩减效果和风速成正比,可以将跑道容量提升5%左右;潘卫军等^[4]基于尾流间隔数值计算模型对B738跟随A359的尾流间隔进行了仿真计算,结果表明,现行间隔标准仍有很大的改进空间;何昕等^[5]构建了CSPRs起飞尾流间隔模型,并以B737跟随B747为例进行验证,仿真结果显示优化后的尾流间隔满足安全运行需求。可以看出,在上述研究中,航空器尾流演化模型有待进一步完善,且尾流间隔缩减系统多为研究一组或几组配对机型的尾流安全间隔,而不是研究尾流间隔标准的缩减效果。如果研究成果是一个巨大的尾流安全间隔矩阵,会严重增加管制员的工作负荷。针对上述问题,可以采用机型聚类的方法对航空器分类,根据新的航空器分类结果构建缩减后的尾流间隔标准,分析其缩减效果。

在航空器机型聚类研究中,王小明等^[6]使用模糊聚类方法对不同机型进行归类,但聚类的数据中缺少翼展、机翼面积等航空器性能参数,研究成果主要应用于运营管理及保障工作;张朋等^[7]使

用模糊聚类算法对航空器燃油消耗的相关数据进行了聚类分析,实验结果表明,聚类的有效性指数较好,能够有效地提取出燃油消耗指标相似的机型,但不能直接用于航空器的尾流等级分类。

因此,本文通过研究隔离运行模式下连续进近着陆的航空器尾流安全间隔缩减方法,针对不同的配对机型计算出新的尾流安全间隔;对航空器性能数据展开聚类分析,根据机型聚类结果构建新的尾流安全间隔标准,同现行尾流安全间隔标准进行分析比较,用于验证尾流间隔缩减方法的实用性。

1 进近航空器尾流安全间隔缩减设计

当前后连续进近着陆的航空器沿同一航线飞行时,其航迹基本保持一致,如果受到较大侧风影响,后机有可能受到前机尾流的影响,如图1所示。

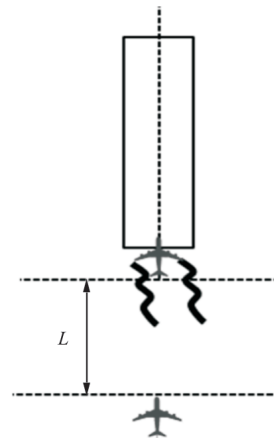


图1 进近航空器尾流遭遇示意图
Fig. 1 Schematic diagram of approach aircraft wake encounter

在稳定的大气条件下,航空器的尾流是向外和向下扩散运动的。但是当前机尾流运动到距离地面0.5倍翼展以下时,涡核高度不会下降,而是开始向外侧移动,涡间距逐渐增大。此外,尾流的运输过程中存在侧风时,涡核将会产生相应的侧移速度。基于此,本文采用镜像涡方法来模拟尾流的运动^[8],以右上涡为研究对象,设右上涡涡核所处位置为 (y, z) ,则左上涡在 (y, z) 处的诱导速度 $\frac{dz}{dt}$ 、 $\frac{dy}{dt}$ 以及侧向飘移速度 V_y 为

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = \frac{\Gamma y}{4\pi(y^2 + z^2)} - \frac{\Gamma}{4\pi y} \\ \frac{dy}{dt} = -\frac{\Gamma z}{4\pi(y^2 + z^2)} + \frac{\Gamma}{4\pi z} \\ V_y = \frac{dy}{dt} + V_{cw} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Gamma = \Gamma_0 \left[\frac{11}{10} - 10^{\left(\frac{-5t_0}{t+5t_0}\right)} \right] \\ \Gamma_0 = W/\rho V b_0 \\ b_0 = sb \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_{cw} 为侧风大小; Γ 为涡流环量。

另外, 本文基于尾流的两阶段衰减模型^[9], 将近尾流的消散过程分为初始消散阶段和快速消散阶段分别展开描述。在近尾流的初始消散阶段, 设定尾涡初始消散时间为 t_c , 从尾流开始生成到 t_c 时刻这段时间内, 尾流的强度变化会受到大气湍流的影响, 并与初始涡间距 b_0 、参考时间 t_0 等参数有关。根据文献^[10]中的相关数据, 得到近尾流初始消散强度变化规律满足如下关系式:

$$\begin{cases} \frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \left[\frac{11}{10} - 10^{\left(\frac{-5t_0}{t+5t_0}\right)} \right] \exp \left\{ - \left[C \left(1 + \frac{y^3}{z^3} \right) + \frac{(Nt_0)^2}{4} \right] \left(\frac{t-t_d}{t_d} \right) \right\} \\ t_d = t_c \left(\frac{z^2}{y^2 + z^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: t_d 为尾涡进入快速消散阶段的时间; y 与 z 分别为尾流的侧向坐标位置与高度坐标位置; N 为浮力频率, 又叫 B-V 频率, 用于表征大气稳定度。

由于跑道参数确定后, 航空器运行程序一般不发生较大变化, 本文从尾流间隔动态化的角度探讨最后进近阶段的尾流间隔缩减问题, 即采用基于滚转力矩系数的尾流分析模型直接计算尾流的临界消散时间, 具体如下:

首先, 考虑连续进近着陆过程中后机进入前机尾涡中心的情形, 通过计算滚转力矩和滚转力矩系数 (Rolling Moment Coefficient, 简称 RMC), 判断后机遭遇尾流时的严重程度, 同时获取相应临界尾流强度以及该时刻下最优的尾流间隔, 公式为

$$RMC = \frac{M_v}{\frac{1}{2} \rho V_i^2 S_i b_i} \quad (4)$$

参考文献^[12], 假设后机机翼满足椭圆翼弦分布, 前机产生的尾涡满足 B-H 环量分布且作用在后机机翼上, 则 RMC 可被表达为包含翼展跨度比 b_i/b_j 的函数, 如下:

$$RMC = \frac{\Gamma}{V_i b_i} \frac{AR_i}{AR_i + 4} G(\epsilon_v) \quad (5)$$

式中: AR_i 为机翼纵横比; V_i 为后机速度; ϵ_v 为关于

式中: W 为升力; ρ 为空气密度; V 为空速; s 为机翼载荷因数; b 为翼展; Γ_0 为初始环量。

尾涡初始消散时间 t_c 与参考时间 t_0 之间的关系, 可以用 Sarpkaya 提出的无因次尾涡开始消散的时间 t_c^* 与无因次紊流度 ϵ^* 之间的关系来计算^[11], 具体过程在此不作赘述。

由于航空器在进近着陆阶段的飞行高度较低, 尾流的消散过程会受地效影响, 当近尾流进入快速消散阶段后, 尾流强度变化规律可描述为

跨度比 b_i/b_f 的函数; b_i 和 b_f 分别为前机翼展和后机翼展。

其次, 考虑航空器运行到最后进近阶段后情形, 此时航空器产生尾流的高度通常在 60 m 以下, 尾流运动会受到地面效应的影响, 进近前后航空器之间所需保持的最小时间间隔 t 和纵向间隔 L 为

$$\begin{cases} t = \frac{t_d \times \ln \frac{\Gamma}{\Gamma_0} \times \left[\frac{11}{10} - 10^{\left(\frac{-5t_0}{t_d+5t_0}\right)} \right]^{-1}}{- \left[C \left(1 + \frac{y^3}{z^3} \right) + \frac{(Nt_0)^2}{4} \right]} + t_d \\ L = V_i \cdot t \end{cases} \quad (6)$$

上述尾流间隔缩减方法计算了在进近着陆过程中前后两架航空器的临界尾流安全间隔, 即计算了指定机型下的尾流安全间隔, 尚未考虑不同机型类别下的尾流间隔标准。因此, 本文将航空器机型聚类方法和临界尾流安全间隔相结合, 构建缩减后的进近航空器尾流间隔标准。

2 基于层次聚类的航空器机型分类

2.1 层次聚类算法的计算流程

航空器机型聚类是通过聚类算法对航空器进

行分类的过程,聚类算法以 K 均值、层次聚类算法为代表。其中,层次聚类算法不仅可以划分多个层次的数据^[13],还能够通过树状结构图表现出不同数据的相关性,因此,研究采用自底而上的层次聚类算法(Aggregative)对民用航空器进行分类,获取部分空客航空器的机型聚类结果如图 2 所示。

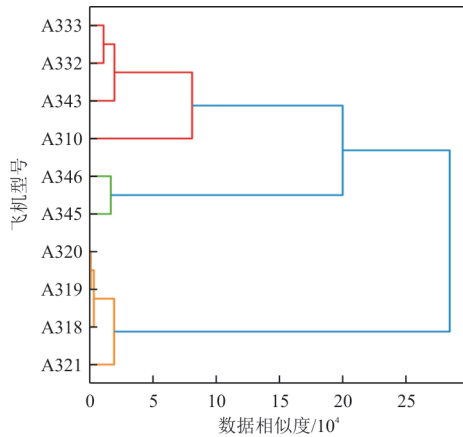


图 2 部分机型的层次聚类结果

Fig. 2 Hierarchical clustering results of some aircraft types

层次聚类算法的计算流程如下:

(1) 初始化:将每个对象看成一个簇 $C_i=[x_i]$, $i=1,2,\dots,N$;

(2) 迭代:设定终止条件为聚类簇的数量 K ,计算聚类簇之间的距离,找出距离最近的两个簇,将这些簇根据某种规则一步步合并,不断合并直到达到预设的簇类个数。聚类簇合并的依据是点间距离最小,计算点间距离的方法主要有三种,分别为 Single Linkage、Complete Linkage 和 Average

Linkage^[14]。其中,Average Linkage 的计算方法是计算两个点集中每个数据点与其他所有数据点之间的距离,以所有距离的平均值作为两点集之间的距离。虽然计算量较大,但它能更好地避免极值的影响,故本文选用这种方法来计算点间的距离。

2.2 航空器性能参数的聚类指标选取

聚类指标是聚类分析的基本输入条件,它们代表着不同类别的属性特征。在航空器分类标准中,国内尾流间隔标准简单地以航空器重量为分类依据,将航空器划分为 3 类;欧美 RECAT 以航空器重量和翼展为分类依据,将航空器划分为 6 类^[15];RECAT-CN(广州白云国际机场、深圳宝安国际机场试行)是在国内现行尾流间隔的基础上,效仿欧美 RECAT 的航空器分类技术,根据翼展和重量两个性能参数,仅仅将重型机做了具体的分类(B类和C类)。

因此,本文参照进近尾流安全间隔模型,从前机产生的尾流强度和后机可接受的临界滚转力矩系数两方面出发,在 BADA 航空器性能数据库中选取机型聚类指标,展开更为精细的航空器聚类分析。所选取的与前机尾流强度有关的指标有: C_1 —翼展(m)、 C_2 —进近阶段平均质量(t)、 C_3 —起飞速度(m/s)、 C_4 —进近速度(m/s)。所选取的与后机能接受临界强度有关的指标有: C_5 —起飞阶段发动机推力(N)、 C_6 —进近阶段发动机推力(N)、 C_7 —机翼诱导阻力系数和 C_8 —寄生阻力系数。

部分机型指标参数如表 1 所示。

表 1 部分机型指标参数
Table 1 Specifications of some models

机型	C_1/m	C_2/t	$C_3/(m \cdot s^{-1})$	$C_4/(m \cdot s^{-1})$	C_5/N	C_6/N	C_7	C_8
A310	12.0	43.9	163.43	131.1	294 320	98 609	0.024 934	0.039 630
A318	5.9	34.1	150.15	125.9	137 570	48 632	0.028 747	0.034 614
A319	6.0	34.1	151.03	127.2	140 720	48 150	0.025 954	0.025 882
A320	6.4	34.1	167.56	136.3	141 040	49 011	0.025 149	0.036 138
A321	7.2	34.1	169.70	138.9	158 520	53 543	0.026 984	0.035 074
A332	19.0	60.3	172.35	140.2	369 950	123 241	0.018 953	0.032 965
A333	17.4	60.3	165.71	133.7	363 130	114 560	0.019 805	0.031 875
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
TRIN	0.134	9.97	99.88	73.9	2 308	21	0.010 058	0.037 185

2.3 基于主成分分析法的聚类指标降维

随着数据集维度的增加,算法学习需要的样本数量呈指数级增加^[16],在高维数据提取与处理的过程中,一般会采取降维的手段对高维特征向量进行处理,如线性判别式分析法和主成分分析法等。鉴于航空器性能数据维度较高,且某些数据具有一定的相关性,本文选取主成分分析法 PCA(Principal Component Analysis, 简称 PCA)对机型指标参数进行降维。PCA 常用于提取数据的主要特征分量,该方法是一种无监督学习方法,且计算简单,适用于区分同一样本类,其求解步骤为^[17]:(1) 设定原始数据为 m 条 n 维数据,所需求的维度为 k ,将原始数据按列组成 n 行 m 列矩阵 X ;(2) 将 X 的每一行(代表一个属性字段)进行零均值化;(3) 求出协方差矩阵;(4) 求出协方差矩阵的特征值及对应的特征向量;(5) 将特征向量按对应特征值大小从上到下按行排列成矩阵,取前 k 行组成矩阵 P ,该矩阵即为降维到 k 维后的数据。使用 PCA 降到 3 维(P_1 、 P_2 、 P_3)的部分数据结果如表 2 所示,其中(P_1 、 P_2 、 P_3)代表一组数据中被提取的主成分信息,无实际意义。

表 2 基于 PCA 方法的降维数据
Table 2 Dimensionality reduction data based on PCA method

机型	P_1	P_2	P_3
A310	161 791.3	-10 225.7	-11.806 0
A318	-272 3.43	-12 005.2	-3.864 1
A319	115.825 1	-10 558.4	-3.255 6
A320	690.037 4	-11 275.3	15.216 2
A321	18 708.93	-10 088.3	15.874 6
A332	241 330.6	-9 859.61	-9.514 3
A333	232 129.3	-3 759.68	-20.084 6
⋮	⋮	⋮	⋮
TRIN	-146 408.350 6	-8 333.272 6	-59.181 2

3 机型聚类下的航空器进近尾流安全间隔效果

3.1 航空器进近尾流安全间隔仿真验证

3.1.1 仿真参数设置

通过 MATLAB 软件的 SIMULINK 模块,搭

建进近航空器尾流间隔缩减系统,并以长沙黄花国际机场东跑道的进场航班数据为仿真对象。考虑到 2020 年 5 月的航班逐渐恢复正常且较稳定,单日进场航班数量在 160 架次左右,且航空器类型的占比与正常时段差异较小,本文选取 2020 年 5 月 14 日的航班计划数据以及长沙黄花国际机场的气象数据进行仿真。数据表明,该机场的常用机型以中型机为主,占比在 97% 以上,轻型机和重型机分别占比 1.2% 左右。另外,统计当日的气象数据,根据不同速度的侧风在 24 小时内所占的比例及该日环境温度的变化情况,仿真过程中设置 ϵ^* 为 0.01, N 为 0.3,侧风的大小为 $-1 \sim 3$ m/s 之间, RMC 值参考欧控测得的临界滚转力矩系数数据^[18]。

3.1.2 仿真结果及分析

由航班计划数据可知,该日航班中型机 A320 与 B738 所占比例最大,重型机以 B744、A333 和 A330 为主。本文选取以下三种机型配对仿真,第一组: B738 跟随 A330; 第二组: A320 跟随 B744; 第三组: A320 跟随 B738。三组机型配对条件下最后进近阶段的仿真结果如表 3 所示。

表 3 三组机型配对条件下最后进近阶段的仿真结果
Table 3 Simulation results of the final approach stage under condition of three groups of aircraft pairing

组别	侧风/ ($m \cdot s^{-1}$)	尾流临界 消散时间/s	纵向间 隔/km	右涡位 移/m	左涡位 移/m
第一组	-1			-23.9	-146.7
	2	85.29	6.3	231.9	109.2
	3			317.2	194.5
第二组	-1			-22.6	-119.9
	2	71.20	4.9	191.1	93.974
	3			262.4	165.1
第三组	-1			-52.5	-97.64
	2	75.10	5.2	172.7	127.6
	3			247.8	202.6

从表 3 可以看出:根据第一组仿真结果,当 B738 中型机跟随 A330 重型机时,临界耗散时间为 85.29 s,纵向间隔为 6.3 km,侧风对尾流侧向飘移影响较大;根据第二组仿真结果,当 A320 中型机跟随 B744 重型机时,耗散时间在 75 s 以内,尾流临界消散的时间明显加快;根据第三组仿真结果,中

型机之间尾流间隔也有较好的缩减效果。

3.2 机型聚类效果

通过改变聚类的簇数,分别将航空器聚成三、五、六类,并与现行尾流间隔标准^[19](轻型机、中型机、重型机)、广州和深圳机场试行的 RECAT-CN (J、B、C、M、L)、欧美 RECAT 标准(A、B、C、D、E、F)对应,用于设定相应航空器分类等级(如表4所示),从而获取本文所提出的航空器尾流间隔缩减系统的使用效果。

表4 基于PCA方法降维的航空器聚类
Table 4 Aircraft clustering based on PCA method dimensionality reduction

机型	三类	五类	六类
A310	重	C	B
A318	中	B	D
A319	中	B	D
A320	中	B	D
A321	中	B	D
A332	重	C	B
A333	重	C	B
⋮	⋮	⋮	⋮
TRIN	轻	L	F

3.3 进近尾流间隔效果对比分析

根据航空器类型聚类结果可以看出,仿真过程中第一组和第二组配对航空器的机型分类一致。因此本文分别以第一组和第三组配对机型的情况为例,设定相应的尾流间隔标准,获取相应的安全间隔缩减效果,如表5~表6所示。

表5 第一组机型尾流间隔缩减效果对比
Table 5 Comparison of the reduction effect of the wake interval of the first group of models

尾流间隔标准	未经缩减的尾流间隔	缩减后的尾流间隔
中型机跟随重型机(现行尾流间隔)	9.3 km	6.3 km
M型机跟随B型机(RECAT-CN尾流间隔)	9.3 km	6.3 km
D型机跟随B型机(欧美 RECAT尾流间隔)	5.0 n mile	3.4 n mile

注:1 n mile=1 852 m。

表6 第三组机型尾流间隔缩减效果对比
Table 6 Comparison of the reduction effect of the wake interval of the third group of models

尾流间隔标准	未经缩减的尾流间隔	缩减后的进近航空器尾流间隔
中型机跟随重型机(现行尾流间隔)	6.0 km	5.2 km
M型机跟随B型机(RECAT-CN尾流间隔)	5.6 km	5.2 km
D型机跟随B型机(欧美 RECAT尾流间隔)	2.5 n mile	2.8 n mile

从表5~表6可以看出:采用本文的尾流缩减方法后,主流配对机型的临界尾流安全间隔均可以控制在7 km以内,与现行的尾流安全间隔标准及广州试行的 RECAT-CN相比,可以缩减0.4 km以上;与欧美 RECAT尾流间隔具有较好的一致性。

4 结论

本文所提出的航空器分类方法与国内外所使用的分类方法具有较好的一致性,且计算出的进近航空器临界尾流间隔可以比国内现行尾流间隔标准缩减0.8 km以上,而且相比于欧美 RECAT尾流间隔标准也具有一定的缩减效果。

参考文献

- [1] HINTON D, CHARNOCK J, BAGWELL D. Design of an aircraft vortex spacing system for airport capacity improvement: AIAA-2000-0622 [R]. USA: NASA Langley Research Center, 2000.
- [2] CAMPOS L M B C, MARQUES J M G. On an analytical model of wake vortex separation of aircraft [J]. The Aeronautical Journal, 2016, 89: 1534-1565.
- [3] 魏志强, 胡杨. 基于风速的动态尾流间隔标准计算方法 [J]. 航空计算技术, 2018, 48(6): 24-28. WEI Zhiqiang, HU Yang. Dynamic wake turbulences interval standard calculation based on wind speed [J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(6): 24-28. (in Chinese)
- [4] 潘卫军, 梁延安, 梁海军, 等. 基于数值计算模型的单跑道起飞间隔安全分析 [J]. 航空计算技术, 2019, 49(4): 4-8. PAN Weijun, LIANG Yan'an, LIANG Haijun, et al. Safety analysis on wake vortex separation based on numerical calculation model for single runway take-off [J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(4): 4-8. (in Chinese)
- [5] 何昕, 侯宇杰, 陈亚青, 等. 基于侧风影响的 CSPRs 起飞

- 尾流间隔优化[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 411-418.
- HE Xin, HOU Yujie, CHEN Yaqing, et al. Optimistic approach to the wake turbulence separation for the takeoff of CSPRs under the crosswind conditions[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2): 411-418. (in Chinese)
- [6] 王小明, 李艳军, 郑庆. 基于模糊聚类的不同机型分类方法研究[J]. 飞机设计, 2014, 34(6): 61-65.
- WANG Xiaoming, LI Yanjun, ZHENG Qing. Different aircraft models classification method based on fuzzy clustering[J]. Aircraft Design, 2014, 34(6): 61-65. (in Chinese)
- [7] 张朋, 李杰, 赵志奇, 等. 面向航路燃油预测的航迹聚类[J]. 航空计算技术, 2019, 49(6): 44-47.
- ZHANG Peng, LI Jie, ZHAO Zhiqi, et al. Track clustering for route fuel prediction[J]. Aeronautical Computing Technique, 2019, 49(6): 44-47. (in Chinese)
- [8] 魏志强. 尾涡流场及安全间隔的建模与仿真[D]. 天津: 中国民航大学, 2008.
- WEI Zhiqiang. The research on modeling and simulation of flow field and safety spacing for wake vortex[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2008. (in Chinese)
- [9] HOLZÄPFEL F. Probabilistic two-phase wake vortex decay and transport model[J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(2): 323-331.
- [10] 谷润平, 徐肖豪, 魏志强. 地面效应对尾涡消散的影响研究[J]. 中国民航大学学报, 2009, 27(3): 1-3.
- GU Runping, XU Xiaohao, WEI Zhiqiang. Research on ground effect for wake vortex decay[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2009, 27(3): 1-3. (in Chinese)
- [11] SARPKEYA T. Decay of wake vortices of large aircraft[J]. AIAA Journal, 1998, 36(9): 1671-1679.
- [12] VISSCHER I D, WINCKELMANS G, TREVE V. A simple wake vortex encounter severity metric: rolling moment coefficient due to encounter of an aircraft with a wake vortex[C]// Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015). Lisboa: ATM, 2015: 201-223.
- [13] 程程, 徐吉辉. 社会网络分析法在国内航空安全管理体系研究现状的应用与分析[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 405-410.
- CHENG Cheng, XU Jihui. Application of social network analysis in review of aviation safety management system research[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 405-410. (in Chinese)
- [14] YADAV N, KOBREN A, MONATH N, et al. Supervised hierarchical clustering with exponential linkage[J]. Machine Learning, 2019(1): 101-112.
- [15] LANG S, LUNSFORD C. RECAT I: Lessons learned from MEM[R]. USA: FAA, 2013.
- [16] 姚光明, 曹悦琪. 基于大数据的空中交通管制运行安全预警研究[J]. 航空工程进展, 2016, 7(4): 452-458.
- YAO Guangming, CAO Yueqi. Research on ATC operation safety warning based on big data[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(4): 452-458. (in Chinese)
- [17] 马昕晖, 智文书, 陈景鹏, 等. 基于主成分分析法与聚类分析法的安全指标体系优化[J]. 装备学院学报, 2014, 25(6): 58-62.
- MA Xinhui, ZHI Wenshu, CHEN Jingpeng, et al. Safety index system optimization based on principal components analysis and clustering analysis method[J]. Journal of Equipment Academy, 2014, 25(6): 58-62. (in Chinese)
- [18] BAREN G V, TREVE V, ROOSELEER F. Assessing the severity of wake encounters in various aircraft types in piloted flight simulations[C]// AIAA Modeling & Simulation Technologies Conference. USA: AIAA, 2017: 19-23.
- [19] 中国民用航空局. 中国民用航空空中交通管理规则: CCAR-93TM-R2[S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.
- Civil Aviation Administration of China. Air traffic management rules for civil aviation of China: CCAR-93TM-R2[S]. Beijing: CAAC, 2017. (in Chinese)

作者简介:

张竞予(1996-),男,硕士研究生。主要研究方向:航空器尾流间隔技术。

桑保华(1979-),女,博士,讲师。主要研究方向:航空器尾流安全间隔技术,低空风切变探测。

田勇(1976-),男,博士,教授。主要研究方向:空中交通管理。

(编辑:马文静)