

飞机尾流间隔标准中的机型分类方法

魏志强, 牟明江

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津, 300300)

摘要 机型分类方法是尾流间隔计算的基础和依据,我国现行机型分类标准与 ICAO 相同,均依据飞机重量进行分类。在欧美国家提出的尾流标准重新分类(RECAT)中,依据最大起飞重量和翼展等参数对机型分类和尾流间隔标准进行了重新调整。首先介绍了现行机型分类方法、RECAT 1.5、RECAT-EU 机型分类方法,然后依据飞机环量计算模型,对国内 43 种常用机型进近着陆阶段的环量进行计算分析,提出基于环量的 RECAT-NEW 机型分类方法。计算表明,RECAT-NEW 机型分类方法中,各机型分类区间平均绝对偏差和标准差均小于 RECAT 1.5 和 RECAT-EU 中各分类区间的该值,可更好地满足 RECAT 研究需要,具有实际参考价值。

关键词 交通运输;机型分类;环量;尾流间隔;间隔标准

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.01.006

中图分类号 V211 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)01-0032-06

Study of Classification of Aircraft Types in the Wake Turbulence Separation Standards

WEI Zhiqiang, MOU Mingjiang

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The classification of aircraft types is the foundation and basis in the wake turbulence separation calculation. Aviation control institutions now in our country are all just the same to ICAO in the classification standards of aircraft types, i. e. the weight of aircraft. In the RECAT proposed by Europe and the United States, the classification of aircraft type and standard of wake turbulence separation have been readjusted according to some parameters such as maximum takeoff weight and wingspan. In this paper, priority is given to the current classification method of aircraft type adopted by aviation control institutions and RECAT 1.5, RECAT-EU classification method of aircraft types in order to achieve the establishment of the aircraft circulation calculation model, calculate and analyze the circulation in the approach-and-landing stage of forty-three common aircraft types, thus putting forward a RECAT-NEW aircraft type classification in terms of circulation. The calculation indicates that in the RECAT-NEW classification method of aircraft type, the average absolute deviation and standard deviation of the classification range for various aircraft types are less than those values in the RECAT 1.5 and RECAT-EU classification ranges, and can further be satisfied for the study requirements of RECAT.

收稿日期: 2017-12-09

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1533116;U1633125)

作者简介: 魏志强(1979—),男,河南浚县人,副教授,主要从事飞机性能研究。E-mail: weizhiqia@sina.com

引用格式: 魏志强, 牟明江. 飞机尾流间隔标准中的机型分类方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(1): 32-37. WEI Zhiqiang, MOU Mingjiang. Study of Classification of Aircraft Types in the Wake Turbulence Separation Standards[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 32-37.

Key words: transportation; aircraft type; circulation; wake turbulence separation; separation standard

飞机在飞行过程中会遭遇尾流风险,前后机之间须保持最小尾流间隔。为了保证安全,民航管理机构按照一定指标对机型进行分类,然后给出不同类别组合下的最小距离间隔。机型分类标准越精细,前后机确定的间隔就会越精准,所以存在缩减间隔的潜力。当前,繁忙枢纽机场容量趋于饱和,在保证安全下缩减尾流间隔能大幅度提高机场容量^[1]。国际民航组织(ICAO)将飞机按最大起飞重量(Maximum Take Off Weight, MTOW)分为重型机、中型机、轻型机三大类,并将 A380 等超大型飞机单独划为一类,制定对应分类机型的间隔标准^[2]。随着飞机性能不断提升,抵抗尾流等不利因素的能力不断加强,该标准在保证前后机安全的同时显得过于保守,从而限制机场容量提升^[3]。空客 A380 等新型大飞机投入使用后,许多空中导航服务提供商(Air Navigation Service Provider, ANSP)根据 ICAO 尾流间隔标准修改了各自的标准。此时,需国际合作来制定一个新的尾流间隔标准^[4]。

欧洲于 2007 年提出尾流标准重新分类(Recategorization, RECAT)概念,美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)于 2009 年开始与欧洲联合开展 RECAT 技术的可行性研究,日本于 2010 年开始启动空管系统革新协同行动(CARATS),计划到 2018 年完成对 RECAT 第一阶段技术的跟踪、消化和推广应用^[5]。FAA 于 2012 年 10 月发布了运行安全通告(Safety Alert for Operators, SAFO),孟菲斯机场于 2012 年 11 月开始成为全球第一个实施运行 RECAT 的机场^[6],美国 KMIA、KPHL、KSDF、KIAH 和 KSSO 等机场从 2013 年开始实施运行 RECAT,欧洲空管局于 2013 年开展了 RECAT-EU 项目研究,FAA 于 2014 年提出 RECAT 1.5 的概念,进一步规范尾流间隔标准^[7-10]。RECAT 不再将 MTOW 作为机型

分类唯一参数,而是依据 MTOW 和翼展(WS)等因素将其重新分为六大类(A-F),并对不同类别组合下的间隔标准也进行了调整。对 RECAT 分类合理性的分析十分重要。尽管 RECAT 分类标准比按重量分类更加精确,但是也不能完全反映尾流强度^[11],有其局限性。

国内现行机型分类和间隔标准与 ICAO 保持一致。目前国内对 RECAT 技术的研究尚属于跟踪消化阶段,聂润兔等围绕 RECAT 对跑道到达容量影响进行了分析^[12];魏志强等通过比较不同国家和地区 RECAT 标准差异性,分析出在加权平均尾流间隔最小的标准下对机场容量影响以及各机型占比对容量影响^[13]。其研究均停留在 RECAT 对机场容量的影响上,尚未对 RECAT 机型分类的合理性进行分析。

1 现行机型尾流分类方法

1.1 基于重量的机型分类方法

在空中交通间隔规定中,最小尾流间隔标准是特殊的一类标准。巡航阶段,飞机前后距离较远,此时尾流遭遇风险甚小,所以最小尾流间隔标准主要应用在机场终端区内进近着陆和起飞离场阶段,尤其以进近着陆阶段为重点使用区域。

由于飞机飞行条件的不同,空中交通管制中通信、导航、监视等设备的差异,各民航管理机构制定的机型分类标准也不尽相同。尾流强度与飞机的重量、翼展、速度均有关系,但飞机重量是最重要、最直接的影响因素,所以各民航管理机构现行的机型分类标准,均以飞机允许最大起飞重量(MTOW)为基础。包括中国在内的大多数 ICAO 成员国均采用 PANS-RAC Doc4444 尾流间隔标准,只有美国和英国等少数国家根据本国实际情况和现实需求制定了自己的机型分类标准(表 1)和尾流间隔标准。

表 1 各民航管理机构机型分类标准

ICAO		CAAC		FAA		CAA	
重型机(H)	$W > 136 \text{ t}$	重型机(H)	$W > 136 \text{ t}$	重型机(H)	$W > 255 \text{ klb}$	重型机(H)	$W > 136 \text{ t}$
中型机(M)	$7 \text{ t} < W \leq 136 \text{ t}$	中型机(M)	$7 \text{ t} < W \leq 136 \text{ t}$	大型机(L)	$41 \text{ klb} < W \leq 255 \text{ klb}$	中型机(M)	$40 \text{ t} < W \leq 136 \text{ t}$
				B757	$22 \text{ klb} < W \leq 25 \text{ klb}$	小型机(S)	$17 \text{ t} < W \leq 40 \text{ t}$
轻型机(L)	$W \leq 7 \text{ t}$	轻型机(L)	$W \leq 7 \text{ t}$	小型机(S)	$W \leq 41 \text{ klb}$	轻型机(L)	$W \leq 17 \text{ t}$

由表 1 可以看出,中国民航局(CAAC)使用的机型分类标准同 ICAO 一致;FAA 沿用了在 ICAO 标准出现之前就已流行的机型分类标准,除了重型机(H)名称相同外,其他分类名称不同,分别为大型

机(L)和小型机(S)类别。由于 B757 依据 MTOW 应划分到大型机类别,但是其产生的尾流强度跟重型机效果相当,所以将其单独划为一类。此外,FAA 使用的分类标准单位为磅,实际机型分类跟

ICAO 机型分类基本一致; 英国民航局(CAA)将 ICAO 中的中型机(M)类别拆分为新的中型机(M)和小型机(S)类别, 并将原中型机分类中 MTOW 偏小的机型划分到轻型机(L)类别中。

上述不同分类标准在实施之前就经过大量研究和论证, 且在实际运行中, 可以满足空管运行安全上的要求, 故该标准是安全可靠的。

1.2 RECAT 机型分类标准

FAA 和欧洲分别制定出各自的 RECAT 机型分类标准, 并进行了多次调整, 现美国最新分类标准为 RECAT 1.5, 欧洲最新分类标准为 RECAT-EU。以下为最新 RECAT 分类标准(表 2)。

表 2 RECAT 分类标准

类别	FAA RECAT 1.5		RECAT-EU	
	MTOW/klb	WS/ft	MTOW/t	WS/m
A	MTOW ≥ 300	WS > 245	MTOW > 100	72 < WS < 80
B	MTOW ≥ 300	175 < WS ≤ 245	MTOW > 100	60 < WS < 72
C	MTOW ≥ 300	125 < WS ≤ 175	MTOW > 100	WS < 52
D	MTOW < 300	125 < WS ≤ 175	MTOW < 100	WS > 32
	MTOW > 41	90 < WS ≤ 125		
E	MTOW > 41	65 < WS ≤ 90	MTOW < 100	WS < 32
F	MTOW ≤ 41	WS ≤ 125	MTOW < 15	
	MTOW < 15.5			

RECAT 中不再以 MTOW 作为划分飞机分类的唯一标准, 而是综合考虑 MTOW 和翼展等因素, 此分类标准将机型分类区间进一步细化, 且更加接近尾流对后机影响, 因而更加科学合理^[14]。同时, 不同机型重新组合后总的加权间隔减小, 增加终端区容量成为必然。

2 基于环量的机型分类方法的优劣性评估

飞机在产生升力时, 其三维机翼下翼面的压强会高于上翼面, 在两个翼尖处的气流就会由下翼面绕过翼尖流到上翼面, 在机翼尖部形成两个强度大小相等, 方向相反的漩涡, 并向后向下扩散运动, 形成尾涡流场^[15-17]。

2.1 飞机尾流强度衡量指标

环量是尾流强度的重要衡量指标, 在民航飞机中, 其代表产生的尾流强度大小, 环量越大, 前机产生的尾流对后机造成的潜在影响力就越大。本文用环量作为飞机尾流强度的衡量指标, 可以直观地反映出环量与飞机重量、翼展等参数的关系, 进一步对 RECAT 分类标准合理性作进一步评估。

由圆柱绕流气动力相关知识^[18], 机翼微元翼段

上的升力与翼剖面上附着涡环量关系为^[19]:

$$l(x) = \rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma(x) \quad (1)$$

式中: ρ_{∞} 为大气密度; V_{∞} 为飞机飞行速度; $\Gamma(x)$ 为翼剖面附着涡环量; x 为翼剖面至飞机纵轴距离。对其整个翼展积分, 得整个飞机升力为:

$$L = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} l(x) dx =$$

$$\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma(x) dx = \rho_{\infty} V_{\infty} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \Gamma(x) dx \quad (2)$$

式中: B 为飞机翼展。对于后掠翼飞机, 翼剖面环量可近似表示为:

$$\Gamma(x) = \Gamma_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{B/2}\right)^2} \quad (3)$$

代入, 并令 $x = -\frac{B}{2} \cos \theta$, 则飞机升力为:

$$L = \rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma_0 \int_0^{\pi} \frac{B}{2} \sin \theta \sqrt{1 - \cos^2 \theta} d\theta \quad (4)$$

即:

$$L = \rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma_0 \frac{B}{2} \left[\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4} \right]_0^{\pi} = \frac{\rho_{\infty} V_{\infty} \Gamma_0 B \pi}{4} \quad (5)$$

所以, 得:

$$\Gamma_0 = \frac{L}{\rho_{\infty} V_{\infty} \pi / 4B} = \frac{nW}{\rho_{\infty} V_{\infty} \pi / 4B} \quad (6)$$

式中: Γ_0 为尾涡初始强度, 也即尾涡环量; n 为飞机法向过载; W 为飞机重力; B 为翼展; ρ_{∞} 为空气密度; V_{∞} 为飞机速度。环量大小与航空器重量正相关, 与航空器速度、翼展、空气密度等因素负相关。

2.2 典型机型的尾涡环量计算参数分析

飞机受其机身和起落架结构强度限制, 在着陆时所能承受冲击载荷有限, 故飞机均有其着陆时所允许的最大重量, 称为最大着陆重量(Maximum Landing Weight, MLW)。由于飞机着陆时有较大的垂直速度, 所以 MLW 一般比 MTOW 小, 且为了保证相应的安全裕度, 实际运行中飞机着陆重量一般为最大着陆重量的 85% 左右^[20], 见图 1。

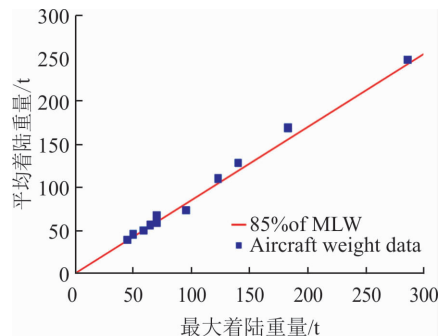


图 1 实际着陆重量与最大着陆重量关系

本文在计算前机环量时, 采用飞机 85% MLW 和 85% MLW 时的进近着陆速度进行计算。A、B、

C 分类中对飞机最大起飞重量的要求均是大于一定值,只是翼展长度有区别,且翼展长度逐渐递减。但是根据环量计算公式,在重量、空气密度、进近速度一定的前提下,翼展越短,其环量值反而越大,故尾流强度越大,明显与实际不符。

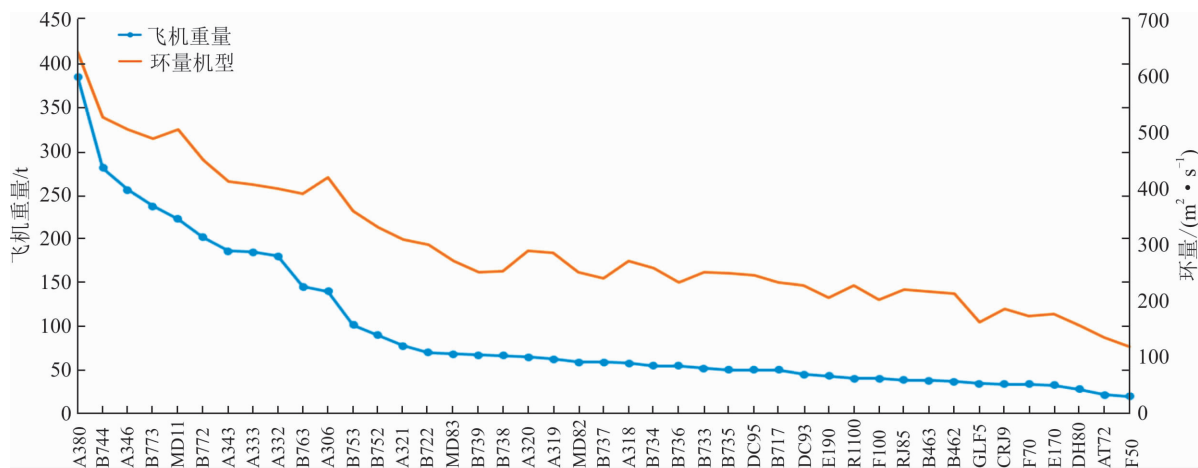


图 2 各机型重量与环量对比结果

由图 2 可以看出,随着不同机型重量的减小,环量并没有随之依次减少。MD11、A306、A320 等机型分别比 B773、B763、B738 等机型重量小,环量却更大,故以飞机重量作为机型划分依据存在其局限性。

2.4 RECAT 1.5、RECAT-EU 机型分类标准

根据上述常用 43 种机型,以 20℃ 时 CAVOK 气象、0 海拔、平均进近速度来分别计算环量。

ICAO 机型尾流分类并无环量异常值。RECAT 1.5 分类标准中,C 类飞机中的 MD11、A306 机型环量值超过了 B 类飞机中 A343、A333、A332 等机型的环量值,E 类飞机中的 RJ100、RJ85、B463、B462 等机型环量值也超过了 D 类飞机中的 F70、GLF5、DH8D、F50 等机型的环量值。RECAT-EU 分类标准中,同样出现低类别环量值大于高类别环量值情况。如果按照 2 种 RECAT 分类标准,当前机为 B 类机型后机为 C 类机型时均遵循 4NM 最小尾流间隔,当前机为 C 类机型后机为 B 类机型时均遵循最小雷达间隔,明显此处缺乏合理性。

RECAT 1.5 与 RECAT-EU 机型分类方法中,各机型所属类别略有差异。在实际操作中,规则需通过管制员来实施,无论哪种机型分类方法与间隔标准,最终都是由管制员发布间隔指令,飞行员接受指令来完成,所以记住不同的机型分类和间隔标准,会增加管制员工作负荷。同时,飞机前后机间保持最小尾流间隔的要求在机场终端区容量趋于饱和,空中交通最繁忙的时段尤为重要,而此时管制员已处于满负荷工作状态。因此,多种

2.3 ICAO 机型分类方法的计算分析

各民航管理机构均以 MTOW 为基础进行机型分类,但飞机重量并不是影响环量的唯一因素。以国内常用 43 种机型为例,分别取得重量值与环量值,比较可得图 2。

机型分类方法共存,在一定程度上会增加管制员出错概率^[21]。

3 基于环量的机型分类方法

环量反映尾涡强度,能更好地表现出前机尾流对后机的影响,因此,在比较不同机型分类标准的基础上提出基于环量的机型分类方法:RECAT-NEW。

3.1 基于环量的机型分类

根据上述 43 种机型环量的计算数据,参照 RECAT 1.5、RECAT-EU 分类结果,提出 RECAT-NEW 机型分类标准(表 3)。对其进行区间划分,确保能保持原比例分类区间内飞机数量基本稳定。

表 3 基于环量的机型分类区间

RECAT-NEW 分类	环量区间/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
A	$\Gamma_0 \geq 530$
B	$410 \leq \Gamma_0 < 530$
C	$390 \leq \Gamma_0 < 410$
D	$200 \leq \Gamma_0 < 390$
E	$110 \leq \Gamma_0 < 200$
F	$\Gamma_0 < 110$

按此 RECAT-NEW 标准,能完全覆盖基于环量的机型信息且与环量大小范围保持一致,并能有效辐射到其余民用飞机机型。

3.2 分类结果的差异性分析

由 RECAT-NEW 机型分类标准,重新调整分类区间内各机型,得出基于环量的机型分类,见表 4。

表4 RECAT-NEW 机型分类标准下各机型所属分类

机型	环量	ICAO 分类	FAARECAT 1.5 分类	RECAT-EU 分类	RECAT-NEW 分类
A380	643.484 421 3	S	A	A	A
B744	528.345 644 1	H	B	B	B
A346	506.327 381 1	H	B	B	
MD11	505.418 250 2	H	C	C	
B773	489.297 985 5	H	B	B	
B772	450.689 989 7	H	B	B	
A306	421.557 053 6	H	C	C	
A343	413.214 792 3	H	B	B	
A333	407.903 033 0	H	B	B	C
A332	399.885 282 9	H	B	B	
B763	390.968 741 5	H	C	C	
B753	360.608 687 2	M	D	C	D
B752	331.401 223 4	M	D	C	
A321	309.609 843 1	M	D	D	
.....					
E190	206.924 707 5	M	D	E	
F100	202.803 480 6	M	D	E	
CRJ9	186.557 633 2	M	E	E	E
E170	178.283 245 4	M	E	E	
F70	172.843 875 5	M	D	E	
GLF5	163.047 468 6	M	D	D	
DH8D	157.734 555 3	M	D	E	
AT72	135.288 476 6	M	E	E	
F50	119.070 720 7	M	D	E	

RECAT 1.5 与 RECAT-EU 机型分类标准的差异性,导致机型分类也有所不同(比如 B752 和 B753 型客机,在 FAA RECAT 1.5 中属于 D 类范畴,在 RECAT-EU 中却属于 C 类范畴),基于环量对机型进行分类,更加简洁清晰,且更加接近实际。

3.3 分类方法的准确性评估

为了保证准确性,同一类别内各个机型环量差异性应尽量小,引入平均绝对偏差和标准差来验证分类方法的准确性。分别计算该 43 种机型在 RECAT 1.5、RECAT-EU 标准下每个类别的平均绝对偏差、标准差,与基于环量的机型分类 RECAT-NEW 对比,见图 3。

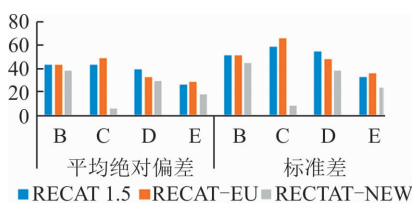


图3 不同机型分类标准下准确性对比

可以看出,基于环量的机型分类 RECAT-NEW 中,各类别的平均绝对偏差、标准差均小于 RECAT

1.5、RECAT-EU 标准,划定的此环量区间,完全覆盖上述 43 种机型,采用此分类方法可对 RECAT 标准进行补充修订,确保后续 RECAT 分类标准更加科学合理。

4 结语

RECAT 机型分类标准比现行 ICAO 分类更为精细,考虑因素更多,不同类别组合下的尾流间隔更短,在两者保证充分安全的前提下采用 RECAT 标准能提高机场容量。本文对国内常用 43 种机型进行不同分类标准下的整理归类,分别计算其环量,对 RECAT 标准下飞机的环量异常值进行重新调整,按相同数量比例进行重新分类,提出基于环量的机型分类方法 RECAT-NEW,对 RECAT 分类标准后续的研究发展提供实际参考价值。

参考文献(References):

- [1] 徐肖豪,赵鸿盛,王振宇. 尾流间隔缩减技术综述[J]. 航空学报,2010,31(4):655-662.
XU X H, ZHAO H S, WANG Z Y. Overview of Wake Vortex Separation Reduction Systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 655-662. (in Chinese)
- [2] 胡军. 空中交通中的尾流安全间隔研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2001.
HU J. Study on Wake Turbulence Safety Separation in Air Traffic[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001. (in Chinese)
- [3] ICAO. Working Document For The Aviation System Block Upgrades[Z]. 28 March 2013.
- [4] ADAMSON P, PHYTHIAN D. European Wake Turbulence Categorisation and Separation Minima on Approach and Departure[Z]. RUROCONTROL, 2015.
- [5] MATAYOSHI N. Reduced Wake Vortex Separation Using Weather Information[M]//Matayoshi N. eds. Lecture Notes in Electrical Engineering, Air Traffic Management and Systems. Tokyo: Springer Japan, 2014: 49-68.
- [6] HENRY J, VEIGH M. Recategorization (RECAT) of FAA Wake Turbulence Separation Categories at Memphis International Airports (MEM) [R]. Washington DC: Federal Aviation Administration, 2013.
- [7] SORIA L, PEETERS B, ANTHONIS J, et al. Operational Modal Analysis and the Performance Assessment of Vehicle Suspension Systems[J]. Shock & Vibration, 2015, 19(5): 1099-1113.
- [8] LISA W, CLARK R L, JEFFREY A, et al. Development of Approach and Departure Aircraft Speed Pro-

- files[J]. *Journal of Aircraft*, 2016, 54(1): 1-10.
- [9] HEIMLICH J. Joint Analysis Team: Wake ReCat in IND/PHL & Fuel Analysis in North Texas[Z]. Next Gen Advisory Committee, 2017.
- [10] LANG S, LUNSFORD C. RECAT I: Lessons Learned from MEM[Z]. FAA, 2013.
- [11] BORENER S S, GUZHVA V S, CROOK I, et al. Safety Assessment of Implemented NextGen Operational Improvements[J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14: 3731-3740.
- [12] 聂润兔, 李冰冰. 尾流分类新标准(RECAT)对跑道容量影响分析[J]. *航空计算技术*, 2015, 45(4): 4-7.
NIE R T, LI B B. Impact Analysis of RECAT to Runway Capacity [J], *Aeronautical Computing Technique*. 2015, 45(4): 4-7. (in Chinese)
- [13] 魏志强, 牟明江, 李志远. RECAT 间隔标准的差异性对比与计算分析[J]. *航空计算技术*, 2017, 47(4): 6-9.
WEI Z Q, MOU M J, LI Z Y. Analysis of Difference Comparison and Calculation of Separation Standard of RECAT. *Aeronautical Computing Technique*, 2017, 47(4): 6-9. (in Chinese)
- [14] CHENG J. The Development of Wake Turbulence Recategorization in the United States [Z]. AIAA 2016-3434.
- [15] 魏志强, 李志远, 刘薇. 侧风影响下的飞机尾流强度消散与涡核运动[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2017, 18(6): 27-33.
WEI Z Q, LI Z Y, LIU W. Research on Aircraft Wake Vortex Strength Dissipation and Vortex Motion under Crosswind Impact[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2017, 18(6): 27-33. (in Chinese)
- [16] 魏志强, 吴金栋, 刘馨泽, 等. 空中交通尾流间隔标准的安全性评估分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(12): 180-185. (in Chinese)
WEI Z Q, WU J D, LIU X Z, et al. Safety Assessment and Analysis on Standard of Wake Separation for Air Traffic[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(12): 180-185. (in Chinese)
- [17] 田志强, 王永虎, 叶佑军. 某航空事故下的尾流遭遇与风险分析[J]. *西安航空学院学报*, 2018, 36(5): 18-22
TIAN Z Q, WANG Y H, YE Y J. Wake Encounter and Risk Analysis in an Aviation Accident [J]. *Journal of Xi'an Aeronautical University*, 2018, 36(5): 18-22. (in Chinese)
- [18] 樊艳红, 晋艳娟, 张柱, 等. 基于 LES 方法的风力机翼型绕流的洞壁干扰影响研究[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2017, 30(4): 567-573.
FAN Y H, JIN Y J, ZHANG Z, et al. Research on the Wall Interference Influence of Wind Turbine Airfoil Based on the Large Eddy Simulation[J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2017, 30(4): 567-573. (in Chinese)
- [19] 魏志强. 尾涡流场及安全间隔的建模与仿真计算研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2008.
WEI Z Q. 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)
- [20] TREVE V. European Proposed RECAT Amendment for Capacity Optimisation WakeNet3-Europe[Z]. EUROCONTROL, 2012.
- [21] 李敬强, 李灏, 王勇, 等. 初始管制员人因差错与神经系统特性相关性分析[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(3): 13-18.
LI J Q, LI H, WANG Y, et al. Research on Correlations Between Human Errors of Raw Controllers and Characteristics of Their Nervous System [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(3): 13-18. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)