

文章编号:1674-8190(2020)06-767-07

配对进近模式分析及研究进展

陈亚青¹, 马义龙², 何昕²

(1. 中国民用航空飞行学院 民航飞行技术与飞行安全重点实验室, 广汉 618307)

(2. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

摘要: 配对进近模式是在近平行跑道上运行的,旨在提高仪表气象条件下的进场效率的一种高效进近模式,该模式的完整流程在国内鲜有阐述。本文重点分析配对进近程序在近平行跑道上运行时各阶段的流程,以及配对进近程序的实施对机型、设备以及人员的具体要求;结合目前国内近平行跑道的运行情况,国际上对配对进近模式的研究和应用现状,指出我国引进配对进近模式的迫切性以及该模式今后的研究和发展趋势。
关键词: 配对进近;近平行跑道;机场容量;仪表飞行程序;运行效率

中图分类号: V355.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.06.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis and Research Progress of Paired Approach Mode

CHEN Yaqing¹, MA Yilong², HE Xin²

(1. CAAC Key Laboratory of Flight Technology and Safety, Civil Aviation Flight

University of China, Guanghan 618307, China)

(2. College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: Paired approach (PA) mode is an efficient approach mode that operates on closely spaced parallel runways (CSPRs) and aims to improve the approach efficiency under instrument meteorological conditions (IMC). The complete process of this mode is rarely elaborated in China. The operational process and definite running requirements of the PA procedure on CSPRs are analyzed. Combined with the present domestic CSPRs operation of the airport and PA model research and application status, the urgency of the proposed PA model introduced into China and the research direction in the future are pointed out.

Key words: paired approach; closely spaced parallel runways; airport capacity; instrument flight procedure; operational efficiency

0 引言

目前,我国平行跑道的仪表运行模式按照跑道用于进、离场的使用方式,可以分为:相关平行仪表

进近模式、独立平行仪表进近模式、独立平行离场模式以及隔离平行运行模式四种方式。但是上述四种运行模式都要求两条平行跑道中心线的间距不小于 760 m,也就是说这四种平行跑道仪表运行

收稿日期:2020-01-08; 修回日期:2020-03-23

基金项目:民航局民航安全能力建设资金支持项目(TM2018-3-1/2);中国民用航空飞行学院创新团队支持项目(JG2019-11);
2019 年度国家级大学生创新训练项目(201910624040);中国民用航空飞行学院面上项目(J2020-066)

通信作者:马义龙,myilong@yeah.net

引用格式:陈亚青,马义龙,何昕. 配对进近模式分析及研究进展[J]. 航空工程进展,2020,11(6):767-773.

CHEN Yaqing, MA Yilong, HE Xin. Analysis and research process of paired approach mode[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 767-773. (in Chinese)

模式都不适用于间距平行跑道^[1]。

当前,世界民航运输业蓬勃发展,我国作为民航大国也正随着民航“一带一路”建设迎来迅猛增长的飞行流量。许多大型枢纽机场,例如北京大兴机场、上海浦东机场、上海虹桥机场、广州白云机场等都建有间距平行跑道,目前这些机场多采用一起一降的类似于隔离平行运行的模式,在相邻的平行跑道实施进近的两机之间需要配备与单跑道运行时相同的间隔。间距平行跑道在这种模式下运行虽然可以在一定程度上增加机场容量,但远没有发掘出其巨大潜力^[2]。

早在 1996 年,美国的 R. Stone 就提出一种针对间距平行跑道运行的类似于相关平行仪表进近的配对进近运行模式,可以使即将在间距平行跑道着陆的航空器实现成对、有序地“同时”进近。该模式大幅度提升了仪表气象条件下的间距平行跑道的容量,缩短了和目视气象条件下进场容量的差距,使得在大部分气象条件下,进场容量保持稳定,给间距平行跑道的运行提供了新的方向^[3]。

国际民航组织(International Civil Aviation Organization,简称 ICAO)于 2010 年提出航空系统组块升级(Aviation System Block Upgrades,简称 ASBU),组块 B1-WAKE 中要素 2 指出,要通过修改尾流间隔的适用方式提高建有间距平行跑道的机场的进场航空器架次^[4]。为此,各国相继开展通过缓解或避开尾流影响进而缩小尾流间隔来增加跑道容量的研究工作,配对进近模式也不断被验证以及完善^[5]。

本文综述了配对进近模式的国内外研究进展,综合分析了配对进近模式的总体流程及配对要求,指出了今后配对进近模式的研究发展方向。

1 配对进近模式

航空器的尾流包括发动机喷流和翼尖涡流,做尾随飞行的飞机遭遇的前机尾流主要是翼尖涡流,当两架飞机在做一前一后尾随飞行时,后机受前机翼尖涡流影响较大^[6]。

配对进近的两机中在前的飞机称为前机(Target Aircraft),在后的飞机称为后机(Trail Aircraft)或间隔管理机(Interval Management Aircraft)^[7]。配对过程中,后机既不能距离前机太远,以免后机误入前机航道或前机错误进近而发生碰

撞,也就是说两机之间要满足一个碰撞安全间隔;同时要求后机不能距离前机太远,以在前机尾流到达前避开其尾流的影响,因此两机之间还需要满足一个尾流安全间隔,如图 1 所示。

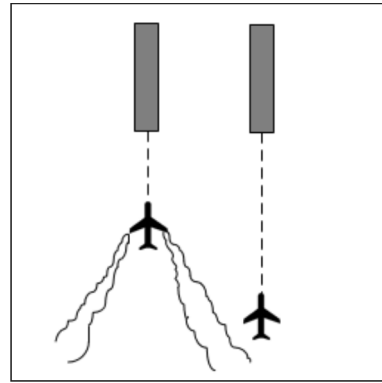


图 1 配对进近示意图^[8-9]

Fig. 1 Schematic diagram of PA^[8-9]

为了同时且更好地避免尾流遭遇和碰撞风险,尾随进近的航空器可以采用 3° 偏置进近的方式,如图 2 所示。此外,尾随航空器可以使用高于前机的进近高度以减小尾流遭遇风险,如图 3 所示。

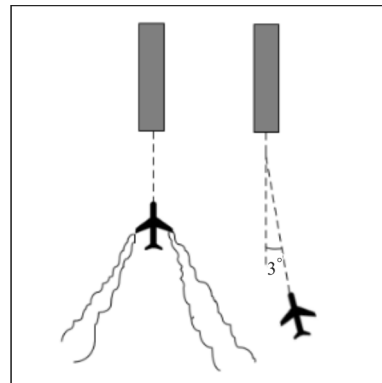


图 2 3° 偏置配对进近示意图^[10]

Fig. 2 Schematic diagram of 3° offset PA^[10]

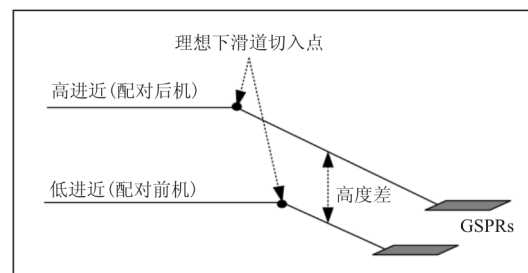


图 3 配对进近剖面图^[11]

Fig. 3 Cross-section drawn of PA^[11]

美国在旧金山、波士顿等 9 个机场使用的同时偏置仪表进近 (Simultaneous Offset Instrument Approach, 简称 SOIA) 模式, 以及近距平行跑道的同时相关进近模式就是典型的配对进近模式, 这种配对进近模式可以在天气恶劣的情况下 (满足仪表气象条件) 增加 25% 的到达班次, 前后两机之间的斜距最小已缩小至 1 n mile (1 852 m), 缩小了尾流间隔, 提高了航班到达率^[11-12]。

2 配对进近程序分析

配对进近程序是以配对进近模式实施进近的飞行程序, 可以使仪表气象条件下的进场容量达到目视气象条件 (Visual Meteorological Condition, 简称 VMC) 下的 85%^[8]。

2.1 配对进近程序要求

配对进近程序的实施首先要求落地机场建有近距平行跑道、仪表着陆系统和区域导航系统, 且要满足 VMC^[7]。配对进近程序自进场航段开始至最后进近阶段结束, 两机驾驶员按照机载设备提示与管制员指挥完成进近^[11]。

2.1.1 机型要求

避开尾流影响是配对进近程序实施过程中的关键一环, 因此在实施配对进近程序前, 必须明确航空器的尾流等级。美国联邦航空管理局 (Federal Aviation Administration, 简称 FAA) 根据航空器的最大起飞重量, 将航空器划分为六个尾流等级, 常见机型的尾流等级划分如表 1 所示。

表 1 常见机型的尾流等级划分^[13]

Table 1 Common aircraft wake turbulence classification^[13]

尾流等级	机 型
B	B741、B742、B743、B744、B748、B772、B773、B788、B789、B78X
C	B762、B763、B764、MD11
D	A319、A320、A321、B737、B738、B739、B752、B753、C919、E195、MD82、MD90、T154
E	CRJ2、CRJ7、CRJ9、E170
F	E110、E120、E121

一般地, 配对进近程序实施过程中, 配对前机为尾流等级为 D、E、F 的航空器 (B757 除外); 配

两机尾随进近的飞机可以是任意尾流等级。实际上, 配对前机尾流等级类型与跑道间距、进近速度等参数有关, 具体应该按照相关管理部门针对不同机场所制定的规章选择^[14]。

2.1.2 设备要求

配对进近程序的精准实施依赖于先进的机载设备和精密的导航系统。实施配对进近程序的机场必须安装仪表着陆系统 (Instrument Landing System, 简称 ILS), 使进近航空器可以实施带有垂直引导的进近程序^[13]。符合实施配对进近程序的航空器都必须配备广播式自动相关监视系统 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 简称 ADS-B), 以及驾驶舱间隔管理 (Flight-deck Interval Management, 简称 FIM) 硬件设备^[15-17]。ADS-B 每秒钟更新一次数据, 包括了发送装置 ADS-B OUT、接收装置 ADS-B IN 和驾驶舱交通信息显示 (Cockpit Display of Traffic Information, 简称 CDTI) 器。此外, 终端区的管制部门还需要装设 ADS-B IN 以实时监控飞行动态。

2.1.3 人员要求

(1) 实施配对进近程序对飞行员的要求

要求飞行员掌握配对进近程序的操作流程, 无论是作为前机的驾驶员还是间隔管理机的驾驶员都应彼此熟知各自的操作流程。此外, 他们必须接受 FIM 设备的操作培训, 包括飞行前、飞行中以及正常和异常程序的处理方法, 还应包括前机进近至决断高度时的复飞程序训练等操作^[13]。

(2) 实施配对进近程序对管制员的要求

作为负责监控并指挥航空器完成进近程序的直接责任人, 进近管制员需要厘清并熟记符合配对条件的典型航空器的机型、典型航空器的进近性能, 保证在航空器进场阶段前可以对可供配对的航空器进行筛选并为其配备初始间隔以及进近速度。此外, 管制员也应当同飞行员一样接受相关设备的操作培训以及配对过程中特殊情况的处理训练。

2.2 配对进近程序流程

(1) 进场和起始进近航段

在距离跑道入口约 18 n mile, 后机进入管制员移交区 (Controller Delivery Zone, 简称 CDZ)。在此前的尾随飞行过程中, 两机应当存在一个

0.5~1.5 n mile 的初始纵向间隔和 300 m 以上的垂直间隔^[16]。

当飞机对进入管制员移交区后,管制员将对尾随飞行的飞机对进行初步筛选,看其是否符合配对进近程序要求^[7]。对于满足配对进近程序要求的飞机对,管制员将在管制员决断点(Controllor Decision Point)发布下降指令,并分别为配对前机和后机配备进近高度和进近速度。后机应以 3° 的偏角实施进近且较前机配备较高的进近高度,此时两机的垂直间隔仍应满足 300 m 的安全间隔。对于不满足配对进近程序要求的飞机对,管制员按照常规的程序指挥^[16]。

(2) 中间和最后进近航段

飞机对飞过管制员决断点后,配对后机的机组通过 ADS-B IN 获取来自配对前机 ADS-B OUT 发送的前机进近速度、下滑角度、飞行高度以及两机纵向间隔等数据,并显示在驾驶舱交通信息显示器 CDTI 上。后机机组根据 CDTI 显示的数据信息进行调整并保持与配对前机的安全距离,以免当配对前机错误进近时与配对后机发生碰撞,且使其能够在到达尾流保护点(Wake Vortex Protection Point)后可以避开前机尾流影响^[16]。

尾流保护点位于两机航向道侧向间距 2 500 ft (762 m) 处,当尾机到达该点时,两机不再需要配备 300 m 的垂直安全间隔。此时前机将以恒定的速度进近,尾机仍根据 FIM 航空电子设备给定的参数调整与前机的距离,保证其始终位于碰撞危险区和尾流危险区之间的理想运行区(Normal Operating Zone,简称 NOZ)内,直至两机确定最后进近定位点各自进近完成配对,前机到达决断高度前飞行员不可以关闭自动驾驶^[16-17]。完整的配对进近程序流程如图 4 所示。

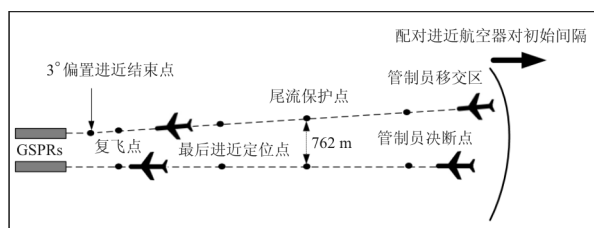


图 4 配对进近程序完整流程图

Fig. 4 Flow diagram of PA procedure

3 配对进近模式研究进展和趋势

自提出至今,配对进近模式的研究重点主要集中在飞机对中前后两机的碰撞安全前界和尾流安全后界及其风险评估,也就是后机的理想运行区域即配对进近安全区域的确定,以及实施配对进近模式后的跑道容量评估。

3.1 国外研究进展

2000 年,美国米特公司首次提出 3° 偏置配对进近,这种同时偏置仪表进近方式可以更好地避免尾流遭遇风险,这一研究成果对此后配对进近模式的研究起到很大作用,为目前波士顿、旧金山等机场实施的同时偏置仪表进近模式提供了理论指导^[10]。2001 年,该公司的先进航空系统发展中心和乔治亚理工大学工业与系统工程学院都在飞行模拟器上对配对进近初始程序进行了测试,为进一步定义驾驶舱任务以及开发驾驶舱间隔管理系统奠定了基础^[18]。2009 年,NASA 提出蒙特卡罗的方法对于配对飞机尾流遭遇风险的模拟计算具有适用性,配对进近的安全区、配对前机错误进近时的碰撞风险也可使用蒙特卡罗方法进行模拟计算^[19-21]。2014 年,兰利研究中心通过构建尾流运动学模型的方法对实施配对进近模式的飞机对进行尾流遭遇风险计算,为使用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)定量的分析尾流遭遇风险提供了参考^[22]。随着民航通信、导航、监视设备和空管新技术的发展,配对进近模式的运行在 ADS-B 监视设备、下一代告警系统 ALAS 等先进设备的支持下变得更加安全和高效,为实施基于间隔管理的配对进近程序奠定了基础^[23-26]。2018—2019 年,由 NASA 出资,MOSAIC ATM 公司、美联航、Honeywell 公司等联合策划并在旧金山国际机场进行了配对进近模式的飞行试验,试验得到的数据为配对进近模式的进一步实施提供了保障^[13,16]。2019 年,美国联邦航空局飞行研究和分析小组,使用快速时间模拟方法对配对进近过程中飞机对的碰撞风险进行分析,得出影响碰撞安全前界的因素为配对前后两机的速度差异、跑道中心线间距及进近对准类型(直线进近或偏置进近)^[27]。

3.2 国内研究进展

3.2.1 配对进近模式碰撞风险研究

我国近距离平行跑道启用较晚,但已有研究者参考国外先进的跑道运行模式对我国在近距离平行跑道上实施配对进近模式进行了可行性分析^[28-30]。2008年3月,随着国内首对近距离平行跑道在上海浦东机场启用,有关配对进近模式的研究也逐步深入到其运行过程中的安全问题。吕宗平等^[31]使用事故树分析法对配对进近的碰撞风险进行了系统性分析;卢飞等^[32]、王健等^[33]基于定位误差分布和导航误差分布以及尾流避让需求建立了配对进近碰撞风险评估模型,对配对进近纵向碰撞风险做出了评估;孙佳等^[34]采用蒙特卡罗方法分别模拟了在有无避让机动时前后机的碰撞风险,并对采用3°偏置进近时的碰撞风险进行了分析,得到可以保证安全的最小间隔;田勇等^[35]在考虑了前机错误进近和尾流对后机的影响,建立了运动学模型,得出前后机的最佳起始纵向间隔;牛夏蕾等^[36]、王莉莉等^[37]通过建立配对进近最小跟驰模型获得前后机的最佳纵向间隔和有效的起始安全区;卢飞等^[38]通过建立配对进近模式的侧向风险评估模型,得出后机采用偏置进近可以有效降低该模式对实际导航性能的要求。

3.2.2 配对进近安全间隔研究

何昕等^[39]考虑了慢机错误地闯入快机航向道和前机尾流在最大不利侧风影响下对后机的影响,分别建立了防撞安全边界和尾流安全边界模型,提出了可以实时、定量地计算两种配对方式下的理想运行区域范围的方法;并基于“人、机、环、管”思想对配对进近运行中可能存在的风险进行了研究,提出人的因素是最关键的因素^[40]。另外,通过建立运动学模型分析配对飞机对安全间隔的方法也是配对进近安全运行研究的热点。宋斐^[2]通过建立机动避让运动模型和尾流运动模型,采用微分对策理论求解两机的运动轨迹,确定了初始的最小纵向间隔值;谷润平等^[17]基于配对进近流程,建立了运动学模型,分析了初始间隔、最大允许间隔等参数的变化对前后两机碰撞风险的影响。我国对于配对进近安全间隔的研究已经初见成果,但缺乏对配对两机动态间隔管理的研究。

3.2.3 近距离平行跑道容量研究

关于实施配对进近程序后近距离平行跑道的容

量问题,也有研究者做出了评估。郑少行等^[41]借鉴单跑道容量模型,构建了配对进近运行模式下的近距离平行跑道容量计算模型,结论表明配对进近模式可以大幅提高近距离平行跑道容量。颜于杰^[42]同样通过近距离平行跑道配对进近的跑道容量评估模型验证了该模式在增加跑道容量上的优势。可见这种运行模式的引入对于我国民航强国建设提供了助力。

3.3 配对进近模型发展趋势

我国民航领域以及对于配对进近模式的研究主要集中在碰撞风险评估、尾流遭遇风险评估即配对进近安全区的前界和后界问题,实施配对进近程序机场的跑道容量评估等几个方面,评估结果与国际相比较为保守,配对进近安全区方面的计算结果相对粗糙,这对于配对进近模式在我国成功实施来说还远远不够。因而在以下四个方面还需做出努力和突破:一是根据国内现有研究成果和实际运行经验推进我国航空器尾流重新分类(RECAT-CN)的进行,完善平行跑道同时仪表运行的管理规定;二是加深对配对进近安全区的研究,使之实现精细化、动态化;三是加快发展民航智能交通系统和空管新技术,研发用于实施实时的间隔管理设备;四是在进行尾流试验后对配对进近程序进行试验飞行。

4 结束语

配对进近模式在旧金山机场的运行体现出了其十分突出的优越性,该模式已成为目前增加近距离平行跑道容量的最佳选择之一。作为民航大国,我国大多数枢纽机场都建有或即将投用近距离平行跑道,巨大的飞行流量需要更多的跑道容量作为支撑,迫切需要引进新的近距离平行跑道运行模式进行跑道扩容,配对进近模式或是最佳模式之一。

参考文献

- [1] 中国民用航空总局. 平行跑道同时仪表运行管理规定: CCAR-98TM[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2004. Civil Aviation Administration of China. The management of simultaneous instrument operation on parallel runways: CCAR-98TM[S]. Beijing: CAAC, 2004. (in Chinese)
- [2] 宋斐. 配对进近模式的安全区域研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2017. SONG Fei. Research on safe zone of paired approach mode

- [D]. Guanghan; Civil Aviation Flight University of China, 2017. (in Chinese)
- [3] WALLER M C, SCANLON C H. Proceedings of the NASA workshop on flight deck centered parallel runway approaches in instrument meteorological conditions [R]. Hampton: NASA, 1996.
- [4] Anon. Aviation system block updates[EB/OL]. [2020-01-08]. <http://www.doc88.com/p-5877788458756.html>.
- [5] CHENG J, TITTSWORTH J, GALLO W, et al. The development of wake turbulence recategorization in the United States[C]// 2015 AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Washington D. C.; AIAA, 2015: 1-6.
- [6] 何昕, 王旭, 张伟伟, 等. 翼尖尾流试验、建模与仿真方法综述[J]. 飞行力学, 2019(5): 1-7.
HE Xin, WANG Xu, ZHANG Weiwei, et al. Review of experiment, modeling and simulation of wing tip wake[J]. Flight Dynamics, 2019(5): 1-7. (in Chinese)
- [7] BONE R, MUNDRA A, OLMOS B O, et al. Paired approach operational concept[C]// 20th Digital Avionics Systems Conference. Daytona Beach; IEEE, 2001: 1-6.
- [8] BONE R S, OLMOS B O, MUNDRA A. Paired approach; a closely spaced parallel runway approach concept [EB/OL]. [2020-01-08]. <https://wenku.baidu.com/view/5cad9cc458f5f61fb736664f.html>.
- [9] TEO R, JANG J S, TOMLIN C J. Flight demonstration of provably safe closely spaced parallel approaches [C] // AIAA Conference on Guidance Navigation & Control. [S. l.]; AIAA, 2004: 1-8.
- [10] HAMMER J. Case study of paired approach procedure to closely spaced parallel runways [J]. Air Traffic Control Quarterly, 2000, 8(3): 256-264.
- [11] FAA. Simultaneous dependent approaches to closely spaced parallel runways; JO7110.308C[S]. US; FAA, 2018.
- [12] SPITZER E A, RUDIS R P, HALLOCK J N, et al. Windline for parallel runway operations at San Francisco airport [C]// 2000 Assembly of the European Geophysical Society Nice. France; Geophysical Society, 2000: 1-4.
- [13] FAA. Aircraft type designators; JO7360.1D[S]. US; FAA, 2018.
- [14] LEIDEN K, PRIESS S, HARRISON P, et al. Paired approach flight demonstration; planning and development activities[C] // Integrated Communications, Navigation & Surveillance Conference. [S. l.]; AIAA, 2018: 1-6.
- [15] HOSAMANI S. Safe speed advisories for flight deck interval management (FIM) paired approach (PA) systems; US2019/0213890 A1[P]. United States, 2019-06-11.
- [16] KENNETH L, MARY E M, CURT K, et al. Paired approach flight demonstration results[C]// 2019 Integrated Communications, Navigation & Surveillance Conference. [S. l.]; AIAA, 2019: 1-7.
- [17] 谷润平, 吴俊, 卢飞. 近距离平行跑道配对进近程序及其碰撞风险研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 37-41, 6.
GU Runding, WU Jun, LU Fei. A study on the procedure of pairing approach and collision risk of short distance parallel runway[J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 40(1): 37-41, 6. (in Chinese)
- [18] BONE R, MUNDRA A, OLMOS B O, et al. Paired approach operational concept[C]// Digital Avionics System, DASC Conference. Daytona Beach; IEEE, 2001: 1-7.
- [19] PRITCHETT S L A. Two studies of paired approaches [C]// ATM-4th International Air Traffic Management R&D Seminar. Santa Fe; ATM, 2001: 1-6.
- [20] MCKISSICK B. Wake encounter analysis for a closely spaced parallel runway paired approach simulation[C]// 2009 AIAA Aviation Technology, Integration & Operations Conference. [S. l.]; AIAA, 2009: 1-5.
- [21] GUERREIRO N M, NEITZKE K W, JOHNSON S C, et al. Characterizing a wake-free safe zone for the simplified aircraft-based paired approach concept[C]// AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. Toronto; AIAA, 2010: 1-6.
- [22] EFTEKARI R R, HAMMER J B, HAVENS D A, et al. Feasibility analyses for paired approach procedures for closely spaced parallel runways[C]// 2011 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. [S. l.]; IEEE, 2011: 1-6.
- [23] MADDEN M M. Kinematic modeling of separation compression for paired approaches to closely-spaced parallel runways[C]// AIAA Aviation Technology, Integration & Operations Conference. [S. l.]; AIAA, 2006: 1-5.
- [24] JOHNSON S C, LOHR G W, MCKISSICK B T, et al. Simplified aircraft-based paired approach concept definition and initial analysis[R]. US; Approach Control, 2013.
- [25] PERRY R B, MADDEN M M, TORRESPOMALES W, et al. The simplified aircraft-based paired approach with the alas alerting algorithm [J]. Perry Raleigh B, 2013 (5): 455-462.
- [26] PRIESS S. Analysis of an ADS-B in method for calculating the interval management paired approach collision safety limit[C]// 2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. [S. l.]; IEEE, 2017: 1-5.
- [27] WILLIAMS M L, WOOD L C, NELSON B J. Safety study of closely spaced parallel operations utilizing paired approach [C]// 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference. San Diego, CA, USA; IEEE, 2019: 1-7.
- [28] 胡明华, 田勇, 李凯. 机场近距离平行跑道进近方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2003, 1(1): 64-69.
HU Minghua, TIAN Yong, LI Kai. Study of approach procedure to closely spaced parallel runways[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2003, 1(1): 64-69. (in Chinese)
- [29] 刘源. 采用近距离平行跑道配对进近可行性探讨[J]. 空中交

- 通管理, 2009(10): 4-5, 25.
- LIU Yuan. Discussions on feasibility of pairing approach of narrow space parallel runways[J]. Air Traffic Management, 2009(10): 4-5, 25. (in Chinese)
- [30] 韩丹. 上海虹桥机场近距平行跑道配对进近的可行性研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2016.
- HAN Dan. A feasibility study on paired approaches to closed spaced parallel runways for Shanghai Hongqiao International Airport[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2016. (in Chinese)
- [31] 吕宗平, 李燕飞, 张兆宁. 基于事故树分析法的配对进近碰撞风险研究[J]. 科技和产业, 2013, 13(4): 130-134, 154.
- LÜ Zongping, LI Yanfei, ZHANG Zhaoning. Research on collision risk for paired approach based on fault tree analysis method[J]. Science Technology and Industry, 2013, 13(4): 130-134, 154. (in Chinese)
- [32] 卢飞, 张兆宁, 魏志强, 等. 近距平行跑道配对进近纵向碰撞风险安全评估[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(8): 108-113.
- LU Fei, ZHANG Zhaoning, WEI Zhiqiang, et al. Longitudinal collision risk safety assessment of paired approach to closed spaced parallel runways[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(8): 108-113. (in Chinese)
- [33] 王健, 张兆宁, 卢飞. 近距平行跑道配对进近纵向碰撞风险安全评估[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 286-292.
- WANG Jian, ZHANG Zhaoning, LU Fei. Longitudinal collision risk safety assessment of paired approach to closed spaced parallel runways[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 286-292. (in Chinese)
- [34] 孙佳, 田勇. 近距平行跑道配对进近中的碰撞风险分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2014, 30(2): 241-245.
- SUN Jia, TIAN Yong. Collision risk analysis of closely spaced parallel runways under parallel dependent approach procedure[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2014, 30(2): 241-245. (in Chinese)
- [35] 田勇, 颜于杰, 万莉莉, 等. 近距平行跑道配对进近运行间隔研究[J]. 航空计算技术, 2015, 45(5): 11-14, 19.
- TIAN Yong, YAN Yujie, WAN Lili, et al. Research on separation of aircrafts for paired approaches to closely spaced parallel runways[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(5): 11-14, 19. (in Chinese)
- [36] 牛夏蕾, 吕宗平, 张兆宁. 近距平行跑道配对进近最小跟驰距离的计算[J]. 航空计算技术, 2015, 45(4): 46-48.
- NIU Xialei, LÜ Zongping, ZHANG Zhaoning. Minimum in-trail distance for paired closely spaced runways[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(4): 46-48. (in Chinese)
- [37] 王莉莉, 朱博, 位放. 近距平行跑道配对进近微观跟驰模型研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(3): 985-988.
- WANG Lili, ZHU Bo, WEI Fang. Microscopic tracing model for the paired approach to the narrow-spaced parallel runways[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(3): 985-988. (in Chinese)
- [38] 卢飞, 朱楠, 杨斯, 等. 近距平行跑道配对进近侧向碰撞风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(11): 87-92.
- LU Fei, ZHU Nan, YANG Si, et al. Assessment of lateral collision risk in closely spaced parallel runways paired approach[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(11): 87-92. (in Chinese)
- [39] 何昕, 蒋豪, 韩丹. 近距平行跑道配对进近方式的安全区域[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 321-327.
- HE Xin, JIANG Hao, HAN Dan. Research on the safe zones for paired approaches to closely spaced parallel runways[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 321-327. (in Chinese)
- [40] 何昕, 张凤飞. 基于MMEM-ISM理论的配对进近运行分析[J]. 科技和产业, 2018, 18(11): 76-81.
- HE Xin, ZHANG Fengfei. Analysis of paired approach operation based on MMEM-ISM theory[J]. Science Technology and Industry, 2018, 18(11): 76-81. (in Chinese)
- [41] 郑少行, 张兆宁. 配对进近运行模式下近距平行跑道容量研究[J]. 航空计算技术, 2013, 43(4): 30-33, 38.
- ZHENG Shaoxing, ZHANG Zhaoning. Research on capacity of closely spaced parallel runways based on paired approach operation mode[J]. Aeronautical Computing Technique, 2013, 43(4): 30-33, 38. (in Chinese)
- [42] 颜于杰. 配对运行模式下的近距平行跑道关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- YAN Yujie. Research on key techniques of closely spaced parallel runways in the paired mode[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)

作者简介:

陈亚青(1970—),男,硕士,教授。主要研究方向:交通运输规划与管理。

马义龙(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:空中交通管理。

何昕(1979—),女,硕士,副教授。主要研究方向:交通运输规划与管理。

(编辑:丛艳娟)