

文章编号: 2095-4980(2018)06-1003-05

动态尾涡间隔缩短技术在民航中的应用

张天俊^{1,2}, 王 洪¹, 陈世浩²

(1.电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731; 2.中电科柯林斯航空电子有限公司, 四川 成都 611731)

摘 要: 尾涡是一种空气漩涡, 是固定翼飞机机翼产生升力的副产品, 它会影响其他飞机的飞行安全。特别是在飞机起飞降落阶段, 飞机遭遇尾涡可能带来灾难性的后果。本文从尾涡的雷达探测、行为预测、尾涡安全系统应用三个方面, 梳理了国内外研究尾涡雷达系统的现状。重点介绍了几种动态尾涡间隔缩短技术, 展望了关于尾涡的拓展应用的前景与方向。

关键词: 尾涡; 尾涡间隔; 动态尾涡间隔缩短; 尾涡咨询系统

中图分类号: TN95

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.1003

Application of dynamic wake vortex separation reduction technology in civil aviation

ZHANG Tianjun^{1,2}, WANG Hong¹, CHEN Shihao²

(1.School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China;
2.Rockwell Collins CETC Avionics Co.,LTD, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: Wake vortex is a kind of turbulence. When a wing of the fixed wing aircraft is generating lift, the wake vortex is formed from the wingtip. Wake vortex is hazardous to other aircrafts especially during the take-off phase. The detection, prediction and safety system application are studied. Some types of the dynamic wake vortex separation system are introduced as well.

Keywords: wake vortex; wake vortex spacing; dynamic wake vortex separation reduction; wake vortex advisory system

按照现行飞行安全准则, 由于空中存在尾涡等因素的影响, 民航飞机在飞行中必须保持一定的距离间隔, 防止因尾涡而造成飞行事故^[1-12]。尾涡是一种湍流, 存在着诸多不稳定性与随机性, 无法做到精确地预测尾涡存在时间以及影响范围, 故民航界通常采用极为保守的间隔距离, 来确保客机的安全飞行。这种间隔在建立后的很长一段时间内, 都被证明是行之有效且安全的。但是随着民航事业的发展, 这种保守的间隔逐渐成为运输效率提升的瓶颈, 因此迫切需要找到一种方法有效解决这个问题。目前有 2 种办法来解决这个问题。一种手段是根据机场的条件, 改进起飞降落的程序, 使飞机避开前机的尾涡作用范围来避开尾涡的影响; 另一种是通过技术手段探测和预测尾涡的状态, 得到相应的尾涡情报来避开尾涡影响^[13]。本文主要讨论后面一种情况。

1 尾涡的介绍

1.1 什么是尾涡

根据空气动力学, 飞机在飞行中会对周围的空气产生作用, 其中对其他飞行器影响较大的主要是飞机身后部形成的尾流。这种分布在飞机后部的一个狭长区域内的尾流是一种湍流, 一般由 3 种类型组成: 一是发动机喷出的气流; 二是附着在飞机表面形成的表面紊流; 三是翼尖涡流(wake vortex)。翼尖涡流是因飞机机翼产生升力而带来的副产品, 其表现形式为飞机身后一对相对旋转的强大旋涡气流。翼尖涡流形成机理是飞机机翼在产生升力的过程中, 由于上机翼的空气压强小于下机翼的空气压强, 机翼下部的空气气流在压差的作用下绕过翼尖, 从而形成旋涡状气流^[14]。通常提到的尾涡主要是指这种翼尖涡流。典型的尾涡持续时间可长达数十秒至数百秒,

在空间上延续数千米之长。一般来说,尾涡的强度与飞机的机型、飞行速度、载重量等有密切关系。翼展越大、重量越重的飞机,产生的尾涡也越强烈,某些重型客机形成的尾流最长甚至可达 10 km^[14]。

1.2 尾涡对飞行安全的影响

飞机产生的 3 种湍流中,发动机喷出的气流和紊流寿命很短,距离影响也比较小,故对其他飞行器的影响不是很大。而尾涡是一种极强的湍流,对其他飞行器的影响较大,需要在研究中重点考虑。它的特点是旋转稳定,存在的时间长,在空间上的延伸广。尾涡的强度主要由飞机自身的质量、空速以及机翼形状决定,其中最主要的影响因素是飞机质量。质量越大,尾涡越强。有记录最大的尾涡气流切线速度高达 67 m/s。这种强烈的气流直接影响了飞行安全并限制了飞机的安全飞行间隔。遭遇尾涡造成的事故频发,以美国为例,根据美国国家运输安全委员会的数据记录,1983 年~2000 年美国发生的尾流事故多达 130 次。2001 年 11 月 12 日,美国航空 587 号航班就是因为遭遇了飞机尾涡,造成机上 260 人全部遇难的严重后果^[1-9]。

1.3 尾涡对民航效率的影响

为了避免此类尾涡事故的发生,民航界不得不实行由国际民航组织制定的如表 1 所示的较为保守的安全飞行间隔标准。采用此标准后,民航客机再也没有发生过遭遇尾涡的事故。但是有证据表明这些规则是在经验的基础上建立的,缺乏足够的科学原理做支撑。过长的尾涡间隔减少了单位时间内航路上飞机的数量,延长了飞机起飞降落的时间间隔,从而减少了单条跑道的起飞降落飞机数量,直接降低了机场的运行效率。因此有必要利用技术手段,根据尾涡的实际影响重新划分更加合理的安全间隔。

表 1 ICAO 尾涡间隔标准
Table1 Standard spacing of wake vortex-ICAO

back plane	front plane		
	heavy/n mile	large/n mile	small/n mile
heavy(>136 T)	4	5	6
large(7~136 T)	3	3	4
small(<7 T)	3	3	3

2 尾涡相关技术研究与应用

民航系统中针对尾涡方面的技术手段,主要集中于尾涡的探测、尾涡影响评估等方面。借助这些技术手段,可在航空交通管制调度飞机的起降时,缩短飞行间隔,提升机场容量。这些技术手段的基础方法通常是利用尾涡的实时数据动态地调整飞行间隔。

关于尾涡应用的系统通常是由尾涡数据获取、数据分析处理、警告显示等几个子系统组成,如图 1 所示。尾涡的数据获取是由尾涡探测、机载天气数据传感器两部分完成。获取的数据送至数据处理中心进行分析,分析后的数据由塔台附近的基站进行传输。处理后的数据结果将显示在终端屏幕上供管制员使用,同时可将结果通过基站广播给其他有需要的飞机。

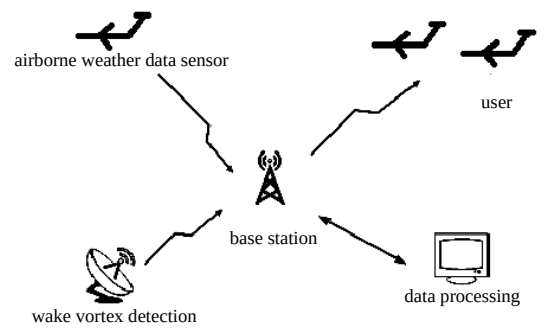


Fig.1 System architecture of wake vortex
图 1 尾涡应用架构

2.1 尾涡的探测技术

目前尾涡的探测技术主要分雷达、激光、声呐 3 种手段。尾涡是一种空气湍流,具有独特的电磁散射特性,因此可以采用特定波段的雷达进行探测。有文献表明^[10],基于雷达的探测技术在实验中多次成功探测到飞机尾部的尾涡气流。目前国外研究机构,例如美国的 FAA(Federal Aviation Administration)和 NASA(National Aeronautics and Space Administration)发起了一系列尾流探测的实验,欧洲国家实施了如 Eurowake,C-Wake,I-Wake,Atc-Wake 等类似的实验。这些实验获得了比较丰富的尾流电磁散射特性信息。目前具有代表性的实验主要有^[10]: 20 世纪 90 年代初, Lincoln 实验室利用高功率(峰值功率 2~7 MW)的 VHF-C 波段脉冲多普勒雷达在太平洋 Kwajalein 环礁探测到了 15 km 距离处的 C-5A 飞机尾流; 1991 年, Nespore 等利用峰值功率 1 MW 的 C 波段脉冲多普勒雷达在新墨西哥州白沙导弹靶场探测到了 2.7 km 距离处的 A-7 轻型攻击机尾流; 2006 年, 法国 Thales 公司利用峰值功率 20 W 的 X 波段 BOR-A550 雷达在巴黎 Orly 机场探测到了 0.7~7 km 距离处的民航客机尾流; 2009 年, Seliga 等利用峰值功率 100 MW 的 W 波段(中心频率 94 GHz)多普勒雷达在小雨条件下,在波士顿 Logan 机场探测到了

0.5~1 km 距离处的民航客机尾流。上述实验获取了有关尾涡丰富的电磁频谱特征, 为理论的发展提供了数据基础。

采用激光雷达(Lidar)对尾涡进行探测是另外一种常见的手段。其基本原理是利用空气中的粒子对激光的散射、反射, 这种散射和反射可被激光雷达探测到, 进而反映出尾涡的形态。激光雷达对尾涡的探测具有较高的精确度, 但是受天气的影响比较大, 目前也处于试验当中。能查阅到的实验结果比较少见。有记录显示最远能探测到 2 km 以内的尾涡气旋。

采用声呐探测的技术目前较为少见。目前大多数研究还停留在理论阶段, 缺乏实际实验的相关数据。

当前尾涡探测的研究仍然以现场试验为主, 理论上的研究成果还有待于加强。实验获取的原始数据也只能部分满足尾涡研究的需求。主要原因是这些实验数据缺乏完整的尾涡数据, 不能准确分析探测技术的性能。另外实验的场景也较少, 只是在特定气候条件下获取的数据, 缺乏代表性。这些问题都需要进一步的研究与实验来解决。

国内针对尾涡的探测研究起步较晚, 于 2005 年才开始启动关于尾涡的探测技术研究。比较突出的是国防科大提出的时-频-空域联合处理技术, 有效地增加了雷达的探测距离, 使其最大探测距离增大到 4.5 倍。

2.2 尾涡危害评估

要评估尾涡对其他飞机的影响, 就需要建立相应的尾涡数学模型。根据尾涡对后机的影响以及尾涡形成及强度两个方面可建立 2 个模型, 即危险遭遇模型和尾流消散模型。这 2 个模型联合起来, 构成一个完整的安全尾流安全间隔模型。此模型可以用来评估前机产生的尾涡对后机的影响范围及强度。但是精确的尾涡模型因数据量巨大, 较难实现, 尚处于研究当中。目前达成的共识是: 当尾涡漂离或者下沉至航道之外, 或者当尾流的强度衰减至与周围大气自由湍流强度相当时, 认为尾涡不再对后机构成威胁。根据这个原则建立的危险遭遇模型可以指导飞行器躲避有害尾涡。

尾涡消散模型主要用于预测尾涡的行为, 目的是说明飞行器产生的尾流持续消散时间与尾流强度大小的关系。尾涡消散模型需要输入机型参数(翼展, 机重, 构型, 发动机的位置等), 气象参数(风速, 大气温度, 气压等)以及消散过程(涡流连结消散, 涡流进散消散, 湍流消散等)。

此外, 尾涡危害的评估需要机载天气数据的支持, 机载传感器目前能实时获得飞机所在位置的风速、温度、气压等气象数据。这些数据作为尾涡行为预测的输入, 系统根据已经选定的尾涡模型, 做出尾涡的发展、消散等预测。

尾涡模型的准确性与实时性是对尾涡危害进行有效评估的基础。NASA 在 2002 年 6 月中提出的 APA(AVOSS Prediction Algorithm)模型, 考察了分层、侧风、湍流、位温纵剖面等方面对尾涡的影响。其他诸如 VFS, VORTEX, D2P, P2P, DVM, PVM, TDAWP, VIPER 等模型^[15-17], 采用了类似的参数去评估尾涡造成的危害和影响, 区别在于参数的侧重点与模型的复杂度。

2.3 系统应用

尾涡探测与预测的数据计算完成后, 会通过不同的方式传输给各个用户, 这些用户包括其他飞机、空中管制员席位。对应的屏幕上显示出尾涡的长度以及强度。管制员或飞行员获得相关信息后, 即可做出相应的策略增强飞行的安全。例如空管员可根据屏幕显示的尾涡范围及强度以及消散时间, 动态地划分飞行器之间的尾流间隔, 飞行员利用屏幕上显示的尾涡情况, 采取安全的起飞降落策略, 避开前机尾涡的有害影响区域。

航空无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA)发布的 DO-360 附录 H 给出了关于尾涡数据的典型应用概念。该系统统称为尾涡安全系统(Wake Vortex Safety System, WVSS)。WVSS 由前飞行器(尾涡产生者)、尾随飞行器(跟随者)、地面设施(ATC 工具)三部分组成。前飞行器获取的天气、尾涡等数据, 通过数据链传输到地面设施。地面设施结合各种雷达探测到的尾涡数据, 对尾涡做出评估预测, 并将结果通过数据链广播系统传给其他飞机, 同时将结果传给空中交通管理(Air Traffic Management, ATM)席位进行空中交通管制。

目前国外的研究机构及企业开发了一系列有关尾涡的系统应用, 这些应用的目的都是为了动态地划分尾涡间隔。目前较为成功的有下面这些系统:

1) 尾流告警系统(Wirbelschleppen Warn System, WVWS), 由 DFS 在 20 世纪 90 年代开发的, 为法兰克福机场服务的一套系统。因法兰克福机场是 2 条平行的跑道, 由于尾涡的影响不能独立运行, 限制了机场的容量。WVWS 系统采用激光雷达测量风速, 然后根据相应的模型(数理统计的方法), 预测出尾涡的最大距离, 并从 3 种计算结果中选取最优的结果提供给管制员。

2) 间隔管理预测系统(Systeme Anticipatif de Gestion des Espacements, SYGE),是由法国快速计算机中心开发的一种尾流间隔预测系统,利用机场上空风的测量数据和 Vortex 尾涡模型来预测单跑道离场航空器的间隔。该系统在巴黎奥利(Orly)和图卢兹机场进行了测试。其特点是尾涡模型比较简单,计算量小。

3) 航空器尾涡间隔系统(Aircraft Vortex Spacing System, AVOSS),该系统是由美国航空航天局开发的,于 2000 年 7 月起用于达拉斯沃斯堡国际机场的一套系统。该系统由天气子系统、尾涡消散预测子系统、尾涡探测子系统、空中交通管制界面等子系统组成。其中天气子系统和尾涡消散预测子系统在整个系统中起着核心的作用。尾涡消散子系统主要运用了湍能耗散率(Eddy Dissipation Rate, EDR)和环量表征尾涡强度算法。这也是所有尾涡间隔缩短系统中最复杂的系统。

根据记录的数据统计,使用尾涡间隔缩减系统后,除在极端条件下,容量均有所提升,例如 SYGE 在大多数时候使航班的容量在原有基础上提升了 3 架/小时,AVOSS 可平均提升 6%,最大可达 16%的机场容量。这种提升是在基于目前饱和量上做出的提升,具有显著的经济价值^[5]。

虽然上述系统均有效地缩短了尾涡间隔,但是仍存在许多不足。例如存在使用机场的限制、只能在特定天气条件下应用等。针对现有技术的不足,NASA 提出了 AVOSS 系统的升级概念,该系统称为尾涡咨询系统(Wake Vortex Advisory System, WVAS),它不仅应用于单跑道着陆,还应用于近距平行跑道的进近、离场和交叉跑道的运行^[17]。在 2003 年 NASA 的报告中,NASA 已经完成了 WVAS 系统的概念操作设计。WVAS 系统最终目标是通过精确的天气数据采集,有效的尾涡预测模型,在保证安全的情况下最大程度地缩减因为尾涡导致的飞行间隔。

4 发展展望

对于民航系统而言,动态地缩减尾涡间隔距离是解决航路拥堵,提升机场容量最为有效的手段。未来的尾涡研究应在以下几个方面做出进一步的探测。

1) 在尾涡探测技术上,继续提升雷达、激光雷达的技术水平,完善尾涡的电磁频谱特征,建立有效的探测手段,提高探测的分辨力与精确度。需要在尾涡的电磁特性建模方面投入更多的研究力量,建立起符合实际的尾涡电磁模型。还可以从改进检测策略方面入手,增强雷达的探测性能。

2) 更高效、更安全的尾涡间隔划分评估系统。在现有技术基础上,进一步缩短尾涡的间隔,达到尾涡间隔实时性的动态调整。并且扩展系统的使用范围,使之适用于更多不同类型的机场,能在更多的天气条件下提供决策咨询。

3) 实现空管系统根据尾涡的情况将飞机的起飞降落进行自动化排序,使起飞和降落的飞机根据路径和尾涡长度的不同,进行航路排序,提升机场效率,减少航班延迟。

4) 发展机载尾涡探测设备和尾涡可视化设备,使尾涡间隔缩短具备高动态、可视化与实时化的特点,并将其整合至飞机自动驾驶仪中,增加自动化驾驶的安全性。

总的来说,尾涡探测和动态间隔缩短技术可在现有的条件下进一步提升机场的容量。采用这种手段提升容量远比新建一个机场更加有利。因此国外研究机构已经投入大量人力物力进行了这方面的研究,并且基于尾涡探测和间隔缩短技术提出了先进的 NextGen 等概念系统,已经大幅度领先国内的研究状态。因此我国需要加大研发力度,尽力缩短这方面技术的差距。

参考文献:

- [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 Xiaohao,ZHAO Hongsheng,WANG Zhenyu. Overview of wake vortex separation reduction system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010,31(4): 655-662.)
- [2] 邢琳琳,高培新. 翼尖尾涡对后机影响研究及规避策略[J]. 天津科技, 2015,42(3):49-50. (XING Linlin,GAO Peixin. Wingtip vortex on a following airplane:an influence study and exploration for prevention strategies[J]. Tianjin Science & Technology, 2015,42(3):49-50.)
- [3] 王菲,张军峰,葛腾腾. 终端空域尾流间隔缩减研究综述[J]. 交通信息与安全, 2014,32(6):15-21. (WANG Fei, ZHANG Junfeng,GE Tengting. An overview of reduction techniques of tail vortex separation at airport airspace[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014,32(6):15-21.)
- [4] 胡军,徐肖豪. 空中交通中尾流间隔的研究[J]. 中国民航大学学报, 2002,20(4):1-5. (HU Jun,XU Xiaohao. Wake vortex separation of ATC[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2002,20(4):1-5.)

- [5] 崔智峰. 尾流间隔与终端区容量增强[J]. 科学之友, 2011(8):135-137. (CUI Zhifeng. The enhancement of wake turbulence separation and terminal area capacity[J]. Friend of Science Amateurs, 2011(8):135-137.)
- [6] 王旭东, 苏金平. 跟进起飞间隔时间的确定[J]. 飞行力学, 2000, 18(1):58-60. (WANG Xudong, SU Jinping. The slot time determination of flight take-off[J]. Flight Dynamics, 2000, 18(1):58-60.)
- [7] 安崇君, 刘长卫. 飞机尾涡对飞行安全的影响[J]. 飞行力学, 2000, 18(4):69-72. (AN Chongjun, LIU Changwei. The influence of the trailing vortex on the flight safety of wing plane[J]. Flight Dynamics, 2000, 18(4):69-72.)
- [8] 韩红蓉, 李娜, 魏志强. 飞机遭遇尾涡的安全性分析[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1):45-49. (HAN Hongrong, LI Na, WEI Zhiqiang. Safety analysis of aircraft encountering wake vortex[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1):45-49.)
- [9] 李军, 王雪松, 刘义, 等. 飞机尾流雷达探测的时-频-空域联合处理[J]. 应用科学学报, 2009, 27(2):150-155. (LI Jun, WANG Xuesong, LIU Yi, et al. Time frequency space domain processing for radar detection of aircraft wake vortices[J]. Journal of Applied Sciences, 2009, 27(2):150-155.)
- [10] 戴幻尧, 狄东宁, 乔会东, 等. 飞机尾流探测技术研究进展及应用前景[J]. 科技导报, 2013, 31(31):66-69. (DAI Huanyao, DI Dongning, QIAO Huidong, et al. Aircraft wake detection technology research and application prospects[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(31):66-69.)
- [11] 蒙亮. 飞机尾流对飞行安全的探讨[J]. 西江月, 2012(25):181-183. (MENG Liang. Discussion on flight safety of aircraft wake[J]. XiJiang Yue, 2012(25):181-183.)
- [12] 刘俊凯. 飞机尾流的雷达检测与跟踪技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012. (LIU Junkai. Radar detection and tracking technology of the aircraft wake vortices[D]. Changsha, China: Graduate School of National University of Defense Technology, 2012.)
- [13] BARBARESCO F, MEIER U. Radar monitoring of a wake vortex: electromagnetic reflection of wake turbulence in clear air[J]. Comptes Rendus Physique, 2010, 11(1):54-67.
- [14] CROW S C. Stability theory for a pair of trailing vortices[J]. Aiaa Journal, 1970, 8(12):2172-2179.
- [15] Aviation Administration Aircraft wake turbulence. USA: Federal AC 90-23G[P]. 2014.
- [16] 刘强, 白存儒, 王明华, 等. 进化算法在航路飞机排序中的应用[J]. 飞行力学, 2009, 27(4):89-92. (LIU Qiang, BAI Cunru, WANG Minghua, et al. Application evolution calculation to aircraft sequencing[J]. Flight Dynamics, 2009, 27(4):89-92.)
- [17] 黄晋, 江文波. 美国 NEXTGEN 建设的现状与未来发展[J]. 科技创新导报, 2014, 11(8):202-203. (HUANG Jin, JIANG Wenbo. Current situation and future development of the NEXTGEN construction in the USA[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014, 11(8):202-203.)

作者简介:



张天俊(1987-), 男, 四川省中江县人, 硕士, 主要研究方向为无线电定位通信等.
email: zjjxt@163.com.

王 洪(1974-), 男, 四川省内江市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为信号与信息处理等.

陈世浩(1979-), 男, 西安市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为图像处理、GPU 通用计算等.