

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-06

A320 与 ARJ21 机型复飞阶段指引跟随飞行特点分析

周鑫¹, 王奇¹, 王东², 孙宏¹, 刘黎力³

(1. 中国民用航空飞行学院 民航飞行技术与飞行安全科研基地, 广汉 618307)

(2. 中国民用航空飞行学院 模拟机训练中心, 广汉 618307)

(3. 云南祥鹏航空有限责任公司 飞行部, 昆明 650000)

摘要: 飞行指引作为现代航空运输飞机自动飞行控制系统的重要功能, 为自动驾驶/飞行员提供飞行姿态操纵指令。目前对于指引跟随飞行特点的研究较少, 选取 A320 与 ARJ21 机型, 分别对其复飞模式下的指引跟随特点进行分析。结果表明: A320 机型复飞阶段俯仰指引是首先调整俯仰以快速达到正爬升率, 随后由速度基准系统在保持最低爬升率前提下追踪目标速度原则给出俯仰角指令; ARJ21 机型则分三个阶段给出复飞俯仰角指令, 分别为初始固定俯仰角控制、基于目标航迹角的俯仰控制和基于目标速度的俯仰控制。通过曲线相似性对 QAR 数据分析, 发现 ARJ21 机型的复飞指引模式跟随效果更好。

关键词: 飞行指引; 复飞阶段; 手动飞行操纵品质; A320 机型; ARJ21 机型; 弗雷歇距离

中图分类号: V249.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Flight characteristics analysis of A320 and ARJ21 in the go-around phase based on flight director

ZHOU Xin¹, WANG Qi¹, WANG Dong², SUN Hong¹, LIU Lili³

(1. Civil Aviation Flight Technology and Flight Safety Research Base, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(2. Simulator training Center, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(3. Flight Department, Lucky Air Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: As an important function of the automatic flight control system of modern air transport aircraft, flight director provides flight attitude control instructions for the automatic pilot/pilot. At present, there are few researches on flight characteristics based on flight director, so A320 and ARJ21 are selected to analyze their flight characteristics of following the guidance in the go-around mode respectively. The results show that the pitch guidance of A320 aircraft during the go-around phase is to adjust the pitch first to quickly reach the positive climb rate, and then the pitch Angle instruction is given by the speed reference system to track the target speed principle under the premise of maintaining the minimum climb rate. The ARJ21 is given pitch Angle command in three stages, namely initial fixed pitch Angle control, pitch control based on target track Angle and pitch control based on target speed. Through curve similarity analysis of QAR data, it was found that the go-around guidance mode of the ARJ21 model has a better following effect.

Key words: flight director; go-around phase; manual operating quality; A320; ARJ21; Fréchet distance

收稿日期: 2023-11-01; **修回日期:** 2024-03-21

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点项目资助(U2033213); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(X2023-33); 民航飞行技术与飞行安全重点实验室开放基金项目(FZ2022ZX49)

通信作者: 王奇(2000-), 男, 硕士研究生。E-mail: wq22331456@163.com

引用格式: 周鑫, 王奇, 王东, 等. A320 与 ARJ21 机型复飞阶段指引跟随飞行特点分析[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-6.

ZHOU Xin, WANG Qi, WANG Dong, et al. Flight characteristics analysis of A320 and ARJ21 in the go-around phase based on flight director[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-6. (in Chinese)

0 引言

自动飞行的出现有效地减轻了飞行员驾驶的工作负荷,使得飞行员更多地担任监控飞机状态和应急处理突发情况的角色^[1],极大地提高了飞行精度,保障飞行安全。随着现代计算机系统的迅速进步,自动飞行控制系统已经成为我国大型民航客机不可或缺的核心系统^[2-5]。飞行指引是自动飞行控制系统的重要功能之一,不论是自动驾驶还是人工驾驶,都需要跟随飞行指引给出的指令操纵飞机,保证飞机按照预定的轨迹飞行。同时,在目前行业内普遍认可的基于能力的培训和评估(Competency-Based Training and Assessment,简称CBTA)理念胜任力框架中,恰当使用飞管和指引系统被确定为衡量飞行员手动飞行胜任力的重要可观察行为指标(Observable behavior,简称OB)。

自动飞行控制系统目前可以应用于全飞行阶段^[6],但在起飞、着陆和复飞等复杂飞行阶段,仍需要飞行员接管操纵。据统计,1985—2010年在执行复飞期间发生了超过25起严重事件^[7],因此复飞操作被航空公司设置为飞行模拟器中经常练习的标准动作。NASA在2018年通过18组机组成员的模拟实验^[8],验证了稳定进近的标准,进一步细化了复飞标准。2013年BEA的一项调查显示中程飞行机组人员在商业飞行中平均每年复飞一次,而长途飞行机组人员每5~10年经历一次复飞^[7],统计显示2023年国内A320机型万架次复飞率约为11.13%,ARJ21机型万架次复飞率约为33.7%,由此可见,复飞在航班运行中是一个相当罕见的事件,但是按行业管理属于不安全事件仍然需要报备。复飞在实际运行中较低的触发频率对飞行员的知识的应用、程序执行、问题的解决和决策、情景意识和信息管理等多项胜任能力都提出较高要求。Frédéric^[9]等选择监控执行复飞操作中飞行员的行为和眼动,并与复飞过程中出现的错误频率等联系起来,进一步分析视觉行为对飞行操纵品质的影响。汪磊等^[10]采用曲线相似度、邢苗英等^[11]采用时间序列分析^[11]、陈农田^[12]采用灰色白画权函数聚类^[12]来客观量化着陆阶段的飞行操纵稳定性。

综上,目前研究较多针对着陆阶段飞行操纵品质的评估分析,复飞操纵能力的研究较少,而飞

行员跟随指引作为复飞操纵中的一个重要特征,相关的评价方法研究未见报道,因此有必要对不同机型飞行指引的设计逻辑进行研究,帮助飞行员正确理解指引的设计逻辑以便更好地飞行,同时也为国产民机飞行指引系统设计优化提供借鉴。为此本文结合QAR数据选取A320与ARJ21这两个国内航班常见机型,分析其复飞模式下的跟随指引飞行特点,以期能为飞行员在出现复飞等类似突发情况时跟随飞行指引手动操纵飞机提供一定参考。

1 飞行指引信号的形成

1.1 飞行导引控制系统

飞行导引控制系统(Flight Guidance and Control System,简称FGCS)作为现代民用飞机自动飞行控制系统中的重要组成部分,能够利用飞机姿态、参数偏差及控制指令,提供飞机姿态的自动控制及飞行状态的实时显示,从而使飞行员更容易地操纵飞机在预设的路径上飞行^[13-16]。飞行导引系统包含的控制功能主要有:自动驾驶、飞行指引以及自动油门。当飞机的飞行导引控制以指令方式衔接后,其俯仰通道和横滚通道会分别垂直模式、横向模式以及多轴模式工作,从而实现飞机飞行航向、速度及高度的控制^[1]。各工作模式及其包含的子模式如图1所示。

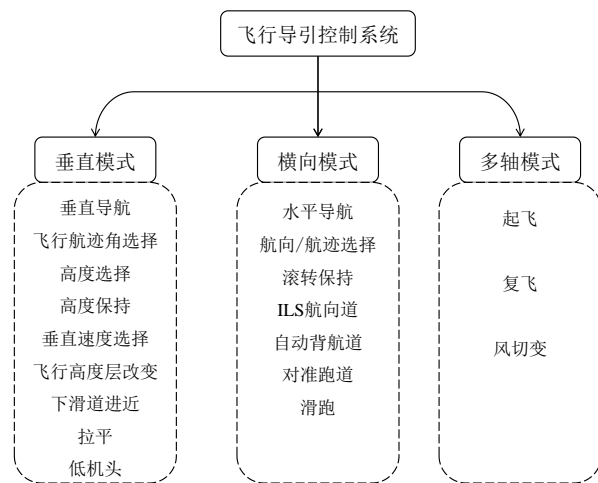


图1 飞行导引系统工作模式示意图

Fig. 1 Flight guidance and control system operating mode diagram

复飞模式下的俯仰指引是通过提供所需的目标俯仰姿态(或达到目标姿态所需的调整)帮助飞行员俯仰指引,捕获并保持爬升所需的安全速度。本文所分析的指引跟随飞行特点均基于复飞模式。

1.2 飞行指引仪

飞行指引仪(Flight Director)根据 FGCS 所设定的不同工作模式,由飞行指引计算机的俯仰通道分别接收高度偏差信号、升降速度偏差信号、空速偏差信号、下滑道偏离信号等,横滚通道分别接收航向偏差、VOR/LOC 无线电偏差信号等,经过滤波、放大、限幅、综合处理后产生俯仰/横滚姿态指引信号,经伺服放大器变换、放大后,驱动指引指示器的伺服电机、减速器带动“V”形指引杆(或十字指引杆的俯仰/横滚指引杆)做上下运动/转动,以目视的形式在主飞行显示(Primary Flight Display,简称 PFD)上显示俯仰/横滚操纵量,为飞行员提供姿态指引^[17]。飞行指引如图 2 所示。

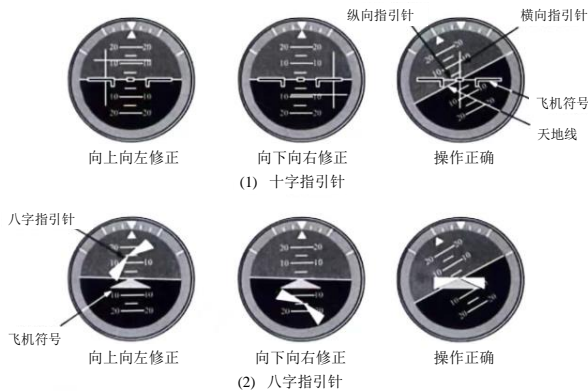


图 2 飞行指引示意图

Fig. 2 Flight guidance diagram

指引信号直观的表明了飞行员需要针对飞机进行横滚、俯仰或偏航的操纵方向及操纵量^[15],指引针离开中立位置越远,需要做的修正应越大;离得越近,需做的姿态修正量越小。在指引针的指示下,飞行员能够正确地操纵飞机,确保其按照预设航迹正确飞行并保持在航迹上。

2 A320 机型指引跟随飞行特点

2.1 A320 机型 FD 指引设计逻辑

A320 在复飞时飞行员必须先设置 TOGA 推

力,在系统内激活复飞逻辑,启动储存在飞行管理系统中的复飞航径和速度基准系统(Speed Reference System,简称 SRS),同时复飞逻辑也会在横滚通道上启用滚转保持模式以保证当前的航向和航迹稳定,直至选择另一个垂直模式。首先,A320 建议以 15° 俯仰角为目标拉杆以快速获得正爬升率(一发失效时为 12.5°),随后遵循 SRS 法则所给出的俯仰指令调整飞行姿态。A320 机型复飞 SRS 引导法则^[18]为:

1. 最低飞行航径角(Flight Path Vector,简称 FPV)保护,确保爬升率不低于 120 ft/min ;
2. 复飞速度保护,目标速度为进近速度或当前速度(二者中较大值),但不得超过 $VLS+25$ 节(双发), $VLS+15$ 节(单发);
3. 复飞姿态保护,确保俯仰不超过 18° (或在遭遇风切变时最大 22.5°)。

2.2 A320 机型复飞案例

选取某 A320 机型航班复飞俯仰姿态数据变化如图 3 所示。

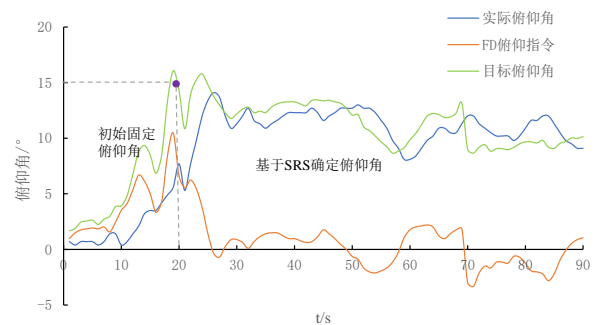


图 3 A320 复飞俯仰角-FD 指引

Fig. 3 A320 go-around pitch angle-FD guidance

从图 3 可以看出:A320 机型的 FD 指引体现为达到目标姿态所需的姿态调整量,而非目标姿态。在复飞初始阶段,快速拉杆,使飞机达到初始固定俯仰角,随后由 SRS 基于目标速度给出俯仰角调整量引导飞行员调整飞机姿态。当实际俯仰角低于目标俯仰角时,FD 指引上移到在零轴之上,指引飞行员增大俯仰角度;实际俯仰角高于目标俯仰角时,FD 指引下移到零轴之下,指引飞行员减小俯仰角度;实际俯仰角接近目标俯仰角时,FD 指引在零轴附近波动。实际俯仰角较目标俯仰角存在一定的滞后性。

3 ARJ21 机型指引跟随飞行特点

3.1 ARJ21 机型 FD 指引设计逻辑

ARJ21 机型分为三个阶段给出复飞俯仰角指令:初始固定俯仰姿态控制、基于目标航迹角的俯仰角控制和基于目标速度的俯仰角^[19]。

在复飞初始阶段,为使飞机尽快转上升,给出固定初始俯仰角指令使得飞机能以稳定的速率抬头,快速转入上升。

根据适航条例规定,双发客机在单发情况下复飞后的正常爬升梯度不得小于 2.1%,全发复飞的爬升梯度不得小于 3.2%,对应的双发复飞目标航迹角为 1.8°,单发复飞航迹角为 1.2°^[20]。当满足以下两种条件任意之一,则给出基于目标航迹角确定的俯仰角指令,以逐渐消除当前航迹角与目标航迹角的偏差,使飞机快速满足规章对复飞爬升梯度要求。

1) 当基于目标航迹角确定的俯仰角指令大于初始俯仰角时;

2) 无论基于目标航迹角确定的第一俯仰角是否大于初始俯仰角,当进入复飞模式达预设时间段之后(该预设时间段可为 6~10 s)。

基于目标航迹角确定的俯仰角调整量计算公式:

$$\Delta\alpha = r_{\text{TRK}}(\text{TRK}_{\text{aim}} - \text{TRK}) + r_{\text{AS}}\text{AS}_P \quad (1)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为基于目标航迹角得到的俯仰角调整量; r_{TRK} 为针对航迹角的增益因子; TRK_{aim} 为目标航迹角; TRK 为当前航迹角; r_{AS} 为针对加速度的增益因子; AS_P 为飞机沿飞行路径的加速度,当飞机的爬升速度稳定后,该值为零。

进而得到俯仰角指令:

$$\alpha_{\text{cmd}} = \alpha + \Delta\alpha \quad (2)$$

式中: α_{cmd} 为俯仰角指令; α 为当前俯仰角。

当 $\Delta\alpha$ 趋近于 0,即飞机当前俯仰角有效跟随俯仰角指令,飞机达到目标航迹角,随后保持此航迹角,增速爬升,直到飞机速度达到目标速度。

当飞机增速达到复飞的目标速度后,则基于当前速度与目标速度之间的速度偏差给出俯仰角指令,使飞机保持目标速度爬升。复飞的目标速度可由飞行员设置(预选空速),或者可为复飞前某一时刻的飞机空速,或者可为预选空速和复飞前的飞机空速中的较大值,等等。对于复飞的目标速度,要求单发情况下目标速度在 $[V_{\text{ref}} + 5, V_{\text{ref}} + 15]$ 区间范围内、双发情况下目标速度则

在 $[V_{\text{ref}} + 5, V_{\text{ref}} + 20]$ 区间范围内。其中, V_{ref} 为飞机进近参考速度。当飞机稳定在爬升速度后,此时飞机俯仰角指令和当前俯仰角近似相等。基于目标速度确定的俯仰角调整量计算公式:

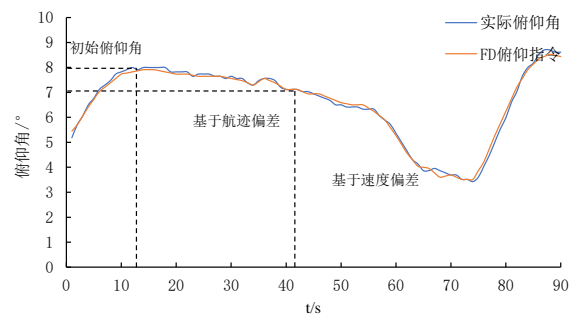
$$\Delta\alpha = r_V(V_{\text{aim}} - V) + r_{\text{AS}}\text{AS}_P \quad (3)$$

式中: r_V 为针对速度的增益因子; V_{aim} 为目标速度; V 为当前速度。

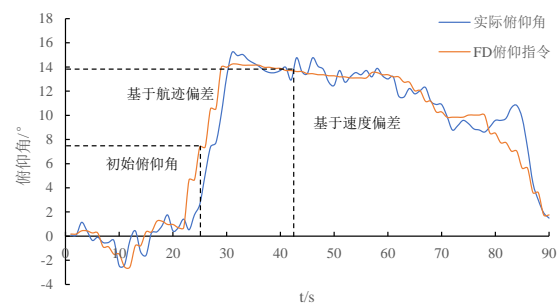
采用上述复飞方式,不仅能快速改出飞机低头趋势,还能保证飞机达到最小的爬升梯度要求和稳定的安全爬升速度。

3.2 ARJ21 机型复飞案例

选取某 ARJ21 机型航班正常复飞与遭遇风切变复飞的俯仰角数据变化如图 4 所示。



(a) ARJ21 正常复飞俯仰角-FD 指引



(b) ARJ21 风切变复飞俯仰角-FD 指引

图 4 ARJ 复飞俯仰角-FD 指引

Fig. 4 ARJ21 go-around pitch angle-FD guidance

ARJ21 的 FD 俯仰指令即为目标俯仰姿态。由图可知,ARJ21 在复飞初始阶段指引为初始固定俯仰角,随后采用基于目标航迹角的俯仰角指令,最后采用基于目标速度的俯仰角指令。遭遇低空风切变特殊情况复飞(如图 4(b)所示)时 ARJ21 实际俯仰角对于 FD 俯仰指令的跟随效果相对于较高高度复飞(如图 4(a)所示)的跟随效果

仍有一定差距,主要原因是风切变发生较迅猛且高度较低,需要飞行员在保证速度等条件下尽快爬升。但在这两种不同情况的复飞过程中,跟随指引效果还是相对 A320 较好,说明飞行员执行复飞操作时仅需专注跟随指引,操作负荷相对较低。

4 对比分析

据统计,ARJ21 机型的复飞发生率为 2%,A320 机型的复飞发生率为 1%,可用于分析的航班数据量少且获取难度大,故本文就两种机型各选取 20 个航班数据进行案例分析。采用弗雷歇距离^[21-23]对两种机型的指引跟随飞行效果进行量化分析,结果如图 5 所示。相似性结果值越高,表明实际俯仰角曲线越偏离目标俯仰角曲线,指引跟随效果越差。反之,表示实际俯仰角与目标俯仰角接近,指引跟随效果好。

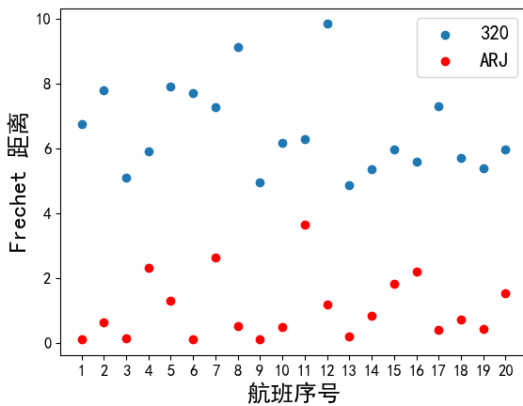


图 5 ARJ21 和 A320 复飞俯仰角-FD 指引弗雷歇距离
Fig. 5 ARJ21 and A320 go-around pitch angle-FD guided Fréchet distance

箱线图作为一种用于显示数据分布情况的统计图表,能够很好地展示一组数据的中位数、上下四分位数、最大值和最小值。20 组 ARJ21 机型和 A320 机型的复飞俯仰角-FD 指引弗雷歇距离箱线图如图 6 所示,可以看出:A320 机型的复飞俯仰角-FD 指引弗雷歇距离集中在 5~7,而 ARJ21 机型复飞俯仰角-FD 指引弗雷歇距离则主要在 0~2,ARJ21 机型复飞俯仰角-FD 指引弗雷歇距离远小于 A320 机型。同时,A320 机型复飞俯仰角-FD 指引弗雷歇距离沿均值向上有较大波动,表明在前文提到的 A320 机型 FD 指引设计逻辑下,飞行员较难达到更好的指引跟随效果。综上,在 ARJ21

的复飞逻辑指引下,飞行员的操纵能够达到更好的跟随效果。

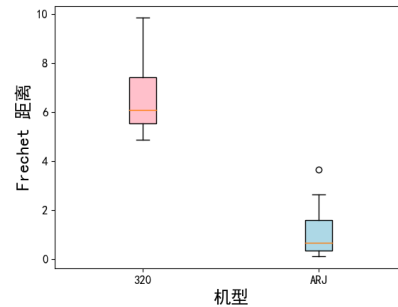


图 6 ARJ21 和 A320 复飞俯仰角-FD 指引弗雷歇距离箱线图

Fig. 6 ARJ21 and A320 go-around pitch angle-FD guided Fréchet distance boxplot

5 结论

1) 本文结合实际航班 QAR 数据对 A320 与 ARJ21 机型复飞模式下俯仰角指令设计特点进行了初步分析。虽然两个机型 FD 指引所表征的含义不同,但其设计逻辑基本一致,即首先建立较大的上仰姿态以使飞机尽快转入爬升,然后将空速保持在合理范围内。所不同的是 A320 机型初始俯仰角设定偏大(目的是给飞行员提供拉杆方向的引导),但允许飞行员根据飞机空速和爬升率的变化灵活处置,而 ARJ21 更强调精确地跟随指引,实际俯仰角和 FD 指引匹配度更高。通过曲线相似性对复飞阶段实际俯仰角和 FD 指引展开分析,证实上述结论。

2) 在遭遇风切变之类复杂气象条件下执行复飞时则不能片面强调跟随指引,而是要求飞行员根据知识经验控制俯仰姿态,在保证飞机尽快爬升的同时将飞机速度控制在合理范围。

参考文献

- [1] 王飞. 大型客机飞行导引控制系统工作模式仿真研究[D]. 天津:中国民航大学, 2021.
WANG Fei. Simulation research on operating mode of flight guidance control system for large passenger aircraft [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021. (in Chinese)
- [2] 李中, 张楠. 新一代民机自动飞行控制系统发展分析[J]. 国际航空, 2012(3): 66-67.
LI Zhong, ZHANG Nan. Research on the automatic flight control system of commercial aircraft[J]. International Aviation, 2012, (3): 66-67. (in Chinese)

- [3] 申安玉, 申学仁, 李云保. 自动飞行控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
SHEN Anyu, SHEN Xueren, LI Yunbao. Automatic flight control system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 柯劭, 王兴波, 魏强. 民用飞机高度综合化自动飞行控制系统研究[J]. 软件导刊, 2015, 14(7): 90-92.
KE Jie, WANG Xingbo, WEI Qiang. Research on highly integrated automatic flight control system for civil aircraft [J]. Software Guide, 2015, 14(7): 90-92. (in Chinese)
- [5] 韩建辉, 张芬, 杜永良. 自动飞行控制计算机通用自动测试平台设计[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 122-131.
HAN Jianhui, ZHANG Fen, DU Yongliang. The design of general automatic testing platform for automatic flight control computer [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 122-131. (in Chinese)
- [6] 李媛媛, 赵宏业, 魏鹏. 民航自动飞控系统需求捕获及确认策略研究[J]. 科技资讯, 2023, 21(14): 245-249.
LI Yuanyuan, ZHAO Hongye, WEI Peng. Research on the requirement capture and validation strategy of the automatic flight control system of civil aircraft [J]. Science & Technology Information, 2023, 21(14): 245-249. (in Chinese)
- [7] BEA. Study of aeroplane state awareness during go-around [R]. Paris, France: BEA, 2013.
- [8] CAMPBELL A, ZAAL P, SCHROEDER J A, et al. Development of possible go-around criteria for transport aircraft [C]// 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, Georgia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018: 1-7.
- [9] DEHAIS F, BEHREND J, PEYSAKHOVICH V, et al. Pilot flying and pilot monitoring's aircraft state awareness during go-around execution in aviation: a behavioral and eye tracking study [J]. The International Journal of Aerospace Psychology, 2017, 27(1/2): 15-28.
- [10] 汪磊, 郭世广, 蒋引, 等. 基于曲线相似度的飞行着陆操作评价方法[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(6): 63-69.
WANG Lei, GUO Shiguang, JIANG Yin, et al. A method of landing operation evaluation based on curve similarity [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(6): 63-69. (in Chinese)
- [11] 邢苗英. 基于时间序列分析方法的着陆阶段飞行品质研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2023.
XING Miaoying. Research on flight quality in landing phase based on time series analysis [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2023. (in Chinese)
- [12] 陈农田. 基于灰色白化权函数聚类的飞行员进近着陆操纵品质评估指标遴选 [J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(6): 195-200.
CHEN Nongtian. Approach and landing manipulation quality assessment indicators selection based on grey whitening weight function clustering [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(6): 195-200. (in Chinese)
- [13] 刘鹏宇. 现代民航飞行导引系统多模式运行研究与仿真 [D]. 天津: 中国民航大学, 2021.
LIU Pengyu. Research and simulation of multi-mode operation of modern civil aircraft flight guidance system [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2021. (in Chinese)
- [14] 邵慧, 岳峰. 基于目标速度控制的民航起飞导引系统设计 [C]// 第六届民用飞机航电国际论坛. 上海: 中国航空学会, 2017: 57-61.
SHAO Hui, YUE Feng. Design of civil aircraft takeoff guidance system based on target speed control [C]// The 6th Annual Civil Avionics International Forum. Shanghai: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2017: 57-61. (in Chinese)
- [15] 杨汀, 高亚奎. 大型飞机飞行指引控制律设计与验证 [C]// The 6th Annual Civil Avionics International Forum. Shanghai: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2017: 484-487.
YANG Ting, GAO Yakui. Design and verification of large aircraft flight guidance control law [C]// The 6th Annual Civil Avionics International Forum. Shanghai: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2017: 484-487. (in Chinese)
- [16] 樊智勇, 王飞, 刘涛, 等. 进近着陆阶段自动飞行工作模式设计与仿真 [J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 19-25.
FAN Zhiyong, WANG Fei, LIU Tao, et al. Design and simulation of automatic flight operating mode in approaching landing stage [J]. Computer Simulation, 2021, 38(3): 19-25. (in Chinese)
- [17] 徐亚军, 魏麟, 李军辉. 民航飞机自动飞行系统 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013.
XU Yajun, WEI Lin, LI Junhui. Civil aviation aircraft automatic flight system [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013. (in Chinese)
- [18] Boeing. A320 Flight crew operation manual [R]. US: Boeing, 2012.
- [19] 周超, 岳峰, 邵慧, 等. 一种用于飞机复飞的方法和装置: CN 201811248289.3 [P]. 2018-10-25.
ZHOU Chao, YUE Feng, SHAO Hui, et al. Method and device for aircraft go-around: CN 201811248289.3 [P]. 2018-10-25. (in Chinese)
- [20] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR25 [R]. 北京: 中国民用航空局, 2016.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards for transport aircraft: CCAR25 [R]. Civil Aviation Administration of China, 2016. (in Chinese)
- [21] BUCHIN K, BUCHIN M, WENK C. Computing the Fréchet distance between simple polygons [J]. Computational Geometry, 2008, 41(1/2): 2-20.
- [22] AGARWAL P K, AVRAHAM R B, KAPLAN H, et al. Computing the discrete Fréchet distance in subquadratic time [J]. SIAM Journal on Computing, 2014, 43(2): 429-449.
- [23] SHARMA K P, POONIA R C, SUNDA S. Map matching algorithm: curve simplification for Fréchet distance computing and precise navigation on road network using RTKLIB [J]. Cluster Computing, 2019, 22(s6): 13351-13359

(编辑: 丛艳娟)