

文章编号: 1674-8190(2023)01-098-06

目标跟踪任务系统设计与应用

张颖, 蒙泽海, 饶秋磊, 何太
(中国飞行试验研究院 飞机所, 西安 710089)

摘要: 人机闭环特性对于完成高精度飞行任务十分关键。为了在试飞配试资源紧缺的条件下有效地检查人机闭环特性, 研制可视化目标跟踪任务系统用以模拟空中受油等高精度任务的操纵过程。该系统通过虚拟目标跟踪算法模拟空中受油任务, 包括编队—预对接—对接—输油保持—脱离整个任务阶段; 面向该系统的虚拟受油任务功能, 进行新型试飞技术研究, 包括试飞方法设计及人机闭环特性评价准则的指标量化。该目标跟踪任务系统已成功应用于某型飞机, 并采用新型试飞技术进行演示验证。结果表明: 该系统可以在单机飞行时模拟执行空中受油任务, 一方面可以有效检查人机闭环特性, 另一方面可以有效地训练飞行员执行精确跟踪任务的驾驶技术, 达到了优化人机闭环特性试飞方法、降低精确跟踪类任务的试飞风险、节约试飞配试资源的良好效果, 所积累的实践经验值得在其他型号上进行推广。

关键词: 人机闭环特性; 目标跟踪任务系统; 空中受油; 编队; 对接

中图分类号: V217

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.01.11

Target tracking mission system design and application

ZHANG Ying, MENG Zehai, RAO Qiulei, HE Tai

(Aircraft Flight Test Technology Institute, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: Man-aircraft closed-loop characteristics is very important for the high precision flight mission. In order to check man-aircraft closed-loop characteristics under the condition of shortage of flight test resources, a visual target tracking system is developed to simulate the control process of high-precision tasks such as air-to-air refueling. Through the virtual target algorithm, the system can simulate air-to-air refueling task, including formation, pre-docking, docking, oil transportation and separation. For the virtual air-to-air refueling task function of the system, a new flight test technology is studied, including the flight test method design and the index quantification of man-aircraft closed-loop characteristics evaluation criteria. The target tracking mission system has been successfully applied to a certain aircraft, and successfully demonstrated by using new flight test technology. The flight test results show that the system can realistically simulate the air-to-air refueling task. On the one hand, it can effectively check the man-aircraft closed-loop characteristics, on the other hand, it can effectively train pilots to improve their flying skills of accurate tracking tasks, which has achieved positive effect of optimizing the flight test method, reducing the risks and saving the costs. The accumulated practical experience is worth popularizing in other types of aircraft.

Key words: man-aircraft closed-loop characteristics; target tracking mission systems; air-refueling; formation; docking

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-08-20

通信作者: 饶秋磊, 67861737@qq.com

引用格式: 张颖, 蒙泽海, 饶秋磊, 等. 目标跟踪任务系统设计与应用[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 98-103.

ZHANG Ying, MENG Zehai, RAO Qiulei, et al. Target tracking mission system design and application[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 98-103. (in Chinese)

0 引言

现代飞机的设计与试验过程中,评价一架飞机飞行品质的好坏不仅取决于飞机本身的动力学特性,还取决于飞行员与飞机、操纵系统、飞控系统之间工作分配的合理性。当执行任务时,飞行员首先根据任务要求对当前获得的各种信息(视觉、听觉、触觉、加速度感觉等)进行判断和比较,然后向操纵系统发出指令,操纵系统一方面给飞行员提供操纵感觉反馈信号,另一方面将指令发送给执行机构,从而改变飞行轨迹、姿态、空速等参数,这些变化又通过不同渠道将信息反馈给飞行员,如此不断循环直到完成飞行任务,这样飞行员、操纵系统、飞控系统、飞机在飞行时组成一个闭环回路,即人机闭环系统^[1]。人机闭环特性是评价人机控制系统回路完成飞行任务的精确程度及力学特性的重要技术指标。按照真实任务场景进行闭环品质评价,如密集编队、空中加油、空战跟踪等,需要多机配试,成本高、风险大,因此采用有效的试飞方法或辅助试飞设备,通过单机试飞对人机闭环特性进行评估是目前的主要方式。

国外对现代先进飞机评估人机闭环特性的试验方法主要包括三向姿态角截获、随机口头指令跟踪、人为选择舱外目视点进行跟踪,进一步地,可以通过在驾驶舱内安装平视显示器设置虚拟参考标记进行跟踪^[2]。其中,三向姿态角截获、随机口头指令跟踪由于过于简单通常难以深入考核人机闭环特性,而平显虚拟标记可以通过写入不同复杂程度的任务算法来设置跟踪任务的难易程度,因此也更能激发潜在的飞行员—飞机系统动态特性。英国在试飞EF2000战斗机时,就在平显上增加了模拟目标运动的指示信号来进行人机闭环特性评价^[3],这种方法的优点在于有利于飞行安全;跟踪的目标信号和飞机响应参数可同步采集记录,便于数据处理与分析^[4];且目标运动规律既可以随机设置,也可以严格复现,便于对试飞结果进行比较分析^[5];可以准确地记录反映飞行员操纵力输入特性的数据^[6];可根据飞行员的特点调节飞行任务的操纵负荷等级;能够节约配试资源,不需要提供目标机、火控雷达等硬件。

国内在人机闭环特性试飞领域一直缺乏有效的研究手段与设备。在民用飞机领域人机闭环特

性试飞过程中,需要由工程师发出随机口头指令,飞行员通过跟踪口头指令给出主观评分,该方法的缺点是无法同时记录口头指令与操纵响应;而军用飞机试飞则需要提供配试目标机以完成跟踪、截获等任务,尚缺少能通过单机试飞评估人机闭环特性的平显虚拟参考标记研究设备^[7-10]。

为了弥补国内在人机闭环特性研究手段上的不足,本文研制可视化目标跟踪任务系统,该系统通过虚拟目标跟踪算法模拟空中受油任务的整个任务阶段,同时面向该系统的虚拟受油任务功能,进行新型试飞技术研究,并进行演示验证。

1 虚拟目标跟踪算法设计

目标跟踪任务系统研制的核心是虚拟目标跟踪算法的设计。为了确保虚拟跟踪任务与真实任务之间的高逼真度和高相似度,设计过程中开发了坐标计算、投影转换、透视除法、视口变换等一系列算法,如图1所示。

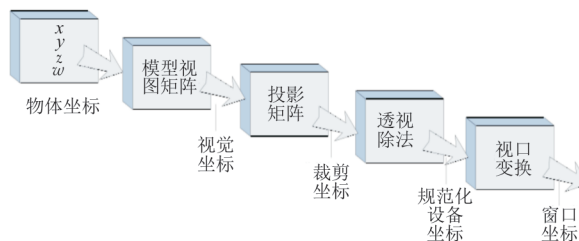


图1 目标显示算法流程图

Fig. 1 Schematic diagram of target display algorithm

(1) 坐标计算:根据飞行参数,实时计算飞机与“虚拟目标”之间的相对位置关系^[11];

(2) 投影转换:将“虚拟目标”投影到机体坐标系以符合飞行员的观察视角(如图2所示);

(3) 透视除法:设计目标的形状变化规律以模拟“近大远小”的视觉成像机制(如图2所示);

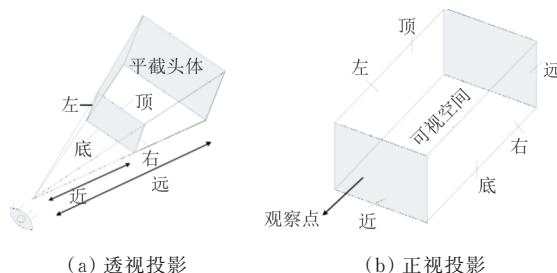


图2 两种投影下的可视空间

Fig. 2 Visible space of two kinds of projection

(4) 视口变换:使屏幕上的像素和变换后的坐标建立对应关系,设置视口的纵横比和可视空间的纵横比相同,防止最终映射到屏幕上的图像发生形变。

依据上述设计步骤,虚拟目标的位置与半径计算方法如式(1)~式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_0) & 0 & -\sin(\theta - \theta_0) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta - \theta_0) & 0 & \cos(\theta - \theta_0) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\psi - \psi_0) & \sin(\psi - \psi_0) & 0 \\ -\sin(\psi - \psi_0) & \cos(\psi - \psi_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x' = X_0 - \int_{t_0}^t \left(\frac{Vx_0}{\sqrt{Vx_0^2 + Vy_0^2}} V_x + \frac{Vy_0}{\sqrt{Vx_0^2 + Vy_0^2}} V_y - \sqrt{Vx_0^2 + Vy_0^2} \right) dt \\ y' = Y_0 - \int_{t_0}^t \left(\frac{Vx_0}{\sqrt{Vx_0^2 + Vy_0^2}} V_y - \frac{Vy_0}{\sqrt{Vx_0^2 + Vy_0^2}} V_x \right) dt \\ z' = Z_0 + \int_{t_0}^t V_h dt \end{cases} \quad (2)$$

$$r = \frac{\arctan\left(H/\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{\arctan(H/L)} R \quad (3)$$

式中: V_x 、 V_y 、 V_h 分别为 GPS 速度中的北向速度、东向速度、天向速度; θ 、 ϕ 、 ψ 为俯仰、滚转、偏航姿态角; H 为加油锥套的几何高度; L 为加油软管伸出的距离; R 为跟踪任务界面中瞄准环的半径; r 为任务界面中虚拟目标的半径; x 、 y 、 z 为虚拟目标在飞机体轴系下的坐标; x' 、 y' 、 z' 为虚拟目标在飞机初始航迹坐标系下的坐标。

为了确保计算结果连续、任务界面连贯,已知

任意可积函数的积分一定连续,算法采用 GPS 天向速度积分解算高度,且任务界面不受气流干扰影响,可提高任务的流畅性^[12]。

2 空中受油任务界面设计

受“菲涅尔灯引导着舰”案例的启发,任务界面设计从受油场景中抽象出“加油探头”“受油锥套”等关键要素,用位置矢量表示跟踪误差,引导飞行员操纵飞机使瞄准环与虚拟目标重合来完成跟踪任务^[13],任务界面如图 3 所示。

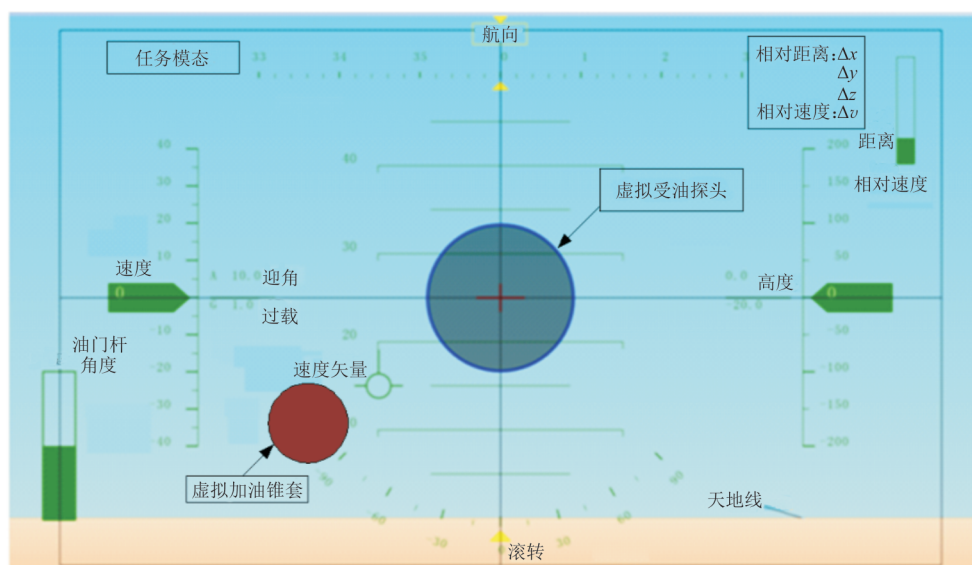


图 3 目标跟踪任务界面

Fig. 3 Target tracking task interface

任务界面可显示两机相对距离 Δx 、 Δy 、 Δz 、 ΔL 以及接近速率 Δv 。 Δx 、 Δy 、 Δz 分别表示两机的前向、侧向、垂向相对距离,相对距离 ΔL 显示进度条的充满程度,接近速率 Δv 表示两机相对速度;虚拟加油锥套代表目标,用来显示做匀速直线运动的锥套相对于受油机机体系的 yOz 平面内的投影,作为被截获跟踪的目标,目标圆点的半径大小根据两机相对距离 L 而变化(近大远小);受油机探头即追踪目标的瞄准环,与受油机机体系固连;通过对两机相对距离 Δx 、 Δy 、 Δz ,接近速率 Δv 以及受油机的保持时间进行组合条件判定,任务模态可以显示任务阶段及判定任务成功与否。任务模态一共包含“预对接模式”“对接成功”“对接任务失败”“输油成功”及“输油中断”等判定信息。

3 试飞技术研究

3.1 试飞方法设计

结合上述空中受油任务界面,设计试飞方法:配平飞机稳定平飞,飞行员在 T_0 时刻按下任务系统显示器上的“目标跟踪”按钮,屏幕上出现一个与飞机“ T_0 时刻”的地速 V_0 大小相等、方向相同的虚拟目标锥套,与飞机的初始距离为 (X_0, Y_0, Z_0) 。飞行员按以下试飞步骤执行完整的空中受油训练:

(1) 编队:操纵飞机由虚拟目标锥套后方100 m、下方50 m,前进至虚拟目标锥套后方50 m、下方5 m,并在此位置稳定平飞2 min。

(2) 预对接:操纵飞机由虚拟目标锥套后方50 m、下方5 m,前进至虚拟目标锥套正后方50 m,并在此位置稳定平飞,等待任务界面显示进入“预对接模式”。

(3) 对接:由虚拟目标锥套正后方15 m,操纵飞机缓慢靠近锥套。通过阶跃油门进行小幅增速,油门阶跃维持一定时间后飞行员收油门减速,需保证受油探头到达对接位置时接近速率 Δv 控制在0.5~1.5 m/s之间。

(4) 输油保持:对接成功后,受油机到达通油位置等待燃油输送,燃油输送成功后,保持受油机在输油包线内;燃油输送2 min后,飞行员执行收油门减速脱离操作,之后下降高度,逐步拉开与加

油机之间的距离。

与传统的编队试飞过程相比,新试飞方法具有以下优势:

(1) 无需配试飞机,能节省资源与成本,任务系统通过读取飞行参数,无论飞机在任意经纬度、高度、航向,点击任务键即可调出目标,能够随时随地快速展开任务;

(2) 与常规双机编队过程中“长机”仅能提供一个“目视影像”作为飞行跟踪对象相比,目标跟踪任务系统实时记录了飞行任务过程中的跟踪误差,可比普通双机任务获得更丰富的试验数据;

(3) 跟踪虚拟目标不必顾虑危险接近与相撞等风险^[14],能集中注意力评价人机功效,在提升任务安全性的前提下,更有利于研究人机闭环特性的设计缺陷^[15]。

3.2 人机闭环特性评估

为了充分运用目标跟踪任务系统所获得的大量试飞数据进行人机闭环特性研究,本文提炼出瞄准率、成功率等客观指标,类似于打靶环数,这些指标可定量地评价人机闭环特性^[16]。由于空中受油任务通常要求飞机加油探头与受油锥套之间的径向误差不超过 ± 0.61 m,故给定0.61 m作为受油任务的误差门限,则可计算出跟踪误差落入此门限中的时间总和^[17],作为瞄准率评价指标。空中受油任务理想的人机闭环特性应能够保证总试验次数中有50%的成功率,可接受的操纵品质应能保证在总试验次数中有25%的成功率,因此任务的成功率可作为明确的客观评价指标^[18]。本文还采用贝德福德评价准则由飞行员进行主观评定^[19]。综合分析主、客观结果就可以得出全面、完整的试飞结论。

4 试飞应用

目标跟踪任务系统目前已在某型飞机上成功进行了演示验证,系统记录的典型目标跟踪任务过程如图4所示,可以看出:随着纵向距离 Δx 的减小,高度误差 Δz 与侧偏误差 Δy 均呈现出明显的长周期振荡模态,这在一定程度上妨碍了飞行轨迹的精确控制。

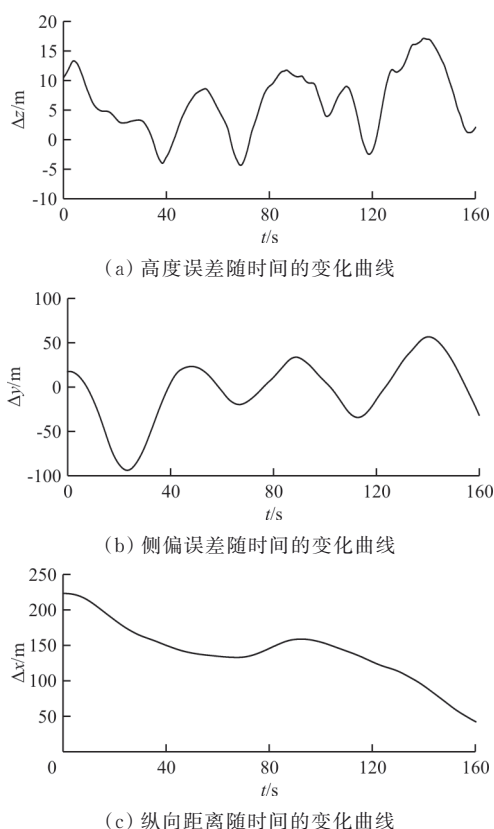


图4 目标跟踪任务时间历程曲线

Fig. 4 Time history curve of target track system

使用目标跟踪任务系统开展飞行训练后,飞行员的操纵技术得到明显提升,如图5所示,可以看出:早期动作误差很大,且呈现出振荡、发散的趋势;经过10余次任务训练后,跟踪误差明显减小、精确保持时间增加,说明驾驶技巧得到了锻炼,已经基本达到近距编队要求。飞行员也在试飞任务单上总结了所获得的驾驶经验,如加、减速时不宜产生过大的速度增量,以避免干扰侧向航迹保持。

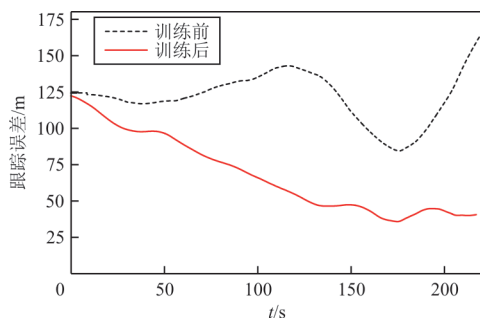


图5 训练前后对比

Fig. 5 Comparison before and after training

目标跟踪任务系统的试飞结论为:功能正常、运行稳定、流畅,能为试飞评述^[20]提供充分的数据支撑。利用目标跟踪任务系统,以往双机编队阶

段才能发现的设计缺陷目前在单机飞行阶段就可以被提前检测到^[21]。例如,发现了“大油门操纵会干扰侧向航迹的保持”这一问题,该缺陷在试飞动作中表现为:每次跟踪任务中飞机侧向误差的振幅总是明显大于高度误差的振幅,如图6所示;而大量任务动作的统计数据也都符合这一规律,如图7所示,可以看出:侧向误差的振幅均明显大于高度误差的振幅。表明跟踪过程中精确控制航向轨迹比控制纵向高度更困难,而“大油门操纵会干扰侧向航迹的保持”显然就是引发“侧向误差振幅大于高度误差振幅”的直接原因。可见目标跟踪任务系统为飞行评述提供了充分的数据支撑,推动了试飞研究由“现象”转向“机理”的深化过程。

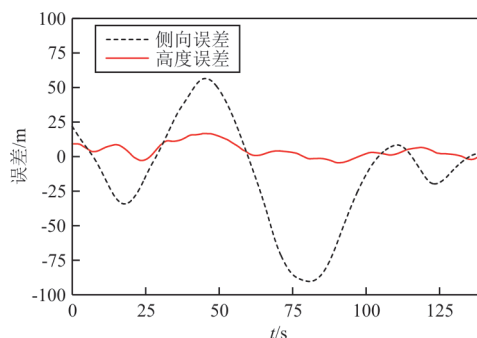


图6 跟踪过程中侧向误差与高度误差的对比

Fig. 6 Comparison of latero-deviation and altitude-deviation during the tracking process

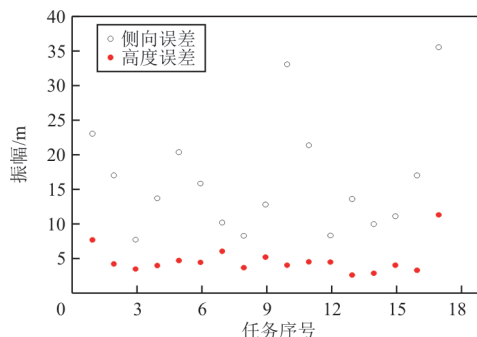


图7 侧向误差与高度误差的振幅对比

Fig. 7 Amplitude comparison of latero-deviation and altitude-deviation

5 结 论

(1) 本文设计了目标跟踪任务系统,将该系统应用于单机闭环任务特性试飞,能在很大程度上激发飞行员—飞机系统动态特性,提供大量的试飞数据有效地进行高增益任务中的人机闭环特性评估及人机工效分析。

(2) 本文开发的虚拟目标跟踪算法及空中受油任务界面成功地模拟了空中受油任务全过程。

试飞应用结果表明,该算法及任务界面能有效地提高飞行员空中受油驾驶技术,规避真实空中受油试飞任务风险,识别空中受油关键技术。

参考文献

- [1] 负正平,王卫军,杨翠霞,等. 人机闭环特性试飞研究[J]. 飞行力学, 2008, 26(6): 73-78.
YUN Zhengping, WANG Weijun, YANG Cuixia, et al. Research on flight test technology of human-machine closed loop characteristics[J]. Flight Dynamics, 2008, 26(6): 73-78. (in Chinese)
- [2] North Atlantic Treaty Organization. Flight test techniques for the assessment of fixed-wing aircraft handling qualities [J]. Flight Test Technique Series, 2021, 33: 1-12.
- [3] HARPER R P, COOPER G E. Handling qualities and pilot evaluation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1986, 9(5): 515-529.
- [4] United States Department of Defense. Military standard, flying qualities of piloted aircraft: MIL-HDBK-1797A [S]. USA: United States Department of Defense, 2004.
- [5] THOMAS P R, BHANDARI U, BULLOCK S, et al. Advanced in air to air refueling[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 71: 14-35.
- [6] HOSMAN R, VAN Der GEEST P, VANDER Z J. Development of a pilot model for the manual bailed landing maneuver[J]. AIAA Journal, 2009, 58: 18.
- [7] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [8] 王磊. 基于相位速率准则的民机PIO评估应用研究[J]. 科技视界, 2017(3): 15.
WANG Lei. Research of civil aircraft PIO assessment based on phase-rate criteria [J]. Science & Technology Vision, 2017(3): 15. (in Chinese)
- [9] 刘军,付琳,徐南波. 民用飞机PIO工程预测准则及试飞方法研究[J]. 航空工程进展, 2016, 7(3): 343-348.
LIU Jun, FU Lin, XU Nanbo. Research on engineering prediction criteria and flight test method of PIO for civil aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(3): 343-348. (in Chinese)
- [10] 周自全,邵箭,王楠. 飞行试验工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
ZHOU Ziquan, SHAO Jian, WANG Nan. Flight test engineering [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [11] 王龙,董新民,贾海燕. 无人机空中加油相对位姿解耦迭代确定算法[J]. 应用科学学报, 2012, 30(4): 427-432.
WANG Long, DONG Xinmin, JIA Haiyan. Decoupled iterative determination algorithm for relative position and attitude of UAV aerial refueling[J]. Journal of Applied Sciences, 2012, 30(4): 427-432. (in Chinese)
- [12] 杨前,刘卫国,路光照. 高空电推进系统的积分滑模反演速度控制[J]. 机电与控制学报, 2012, 16(6): 50-56.
YANG Qian, LIU Weiguo, LUO Guangzhao. Integral sliding mode inversion speed control of high altitude electric propulsion system [J]. Journal of Electromechanical and Control, 2012, 16(6): 50-56. (in Chinese)
- [13] 肖珺. 通用加油监视系统试验平台设计及试验内容[J]. 科技创新与应用, 2021(5): 78-80.
XIAO Jun. Design and test contents of test platform for general refueling monitoring system [J]. Scientific and Technological Innovation and Application, 2021(5): 78-80. (in Chinese)
- [14] BOLKCOM C, KLAUS J D. Air force aerial refueling methods: flying boom versus hose-and-drogue [EB/OL]. (2005-05-11) [2022-02-09]. https://www.researchgate.net/publication/235098934_Air_Force_Aerial_Refueling_Methods_Flying_Boom_Versus_Hose-and-Drogue.
- [15] 李永红,王浚羽,李宇峰,等. 空中加油飞行模拟器评分系统设计实现[C]// 2020中国系统仿真与虚拟现实技术高层论坛. 北京: 中国自动化学会, 2020: 23-26.
LI Yonghong, WANG Junyu, LI Yufeng, et al. Aerial refueling flight simulator evaluation system [C] // 2020 China System Simulation and Virtual Reality Technology High Level Forum. Beijing: Chinese Association of Automation, 2020: 23-26. (in Chinese)
- [16] NATO Standardization Agency. Air to air refueling: ATP-56 (B)[S]. US: NATO Standardization Agency, 2010.
- [17] ZHI J H, DONG X M, KONG X W, et al. Drogue recognition and location for UAV autonomous aerial refueling based on camera calibration[C]// The 33rd China Control Conference. Nanjing: Chinese Association of Automation, 2014: 5-12.
- [18] VEPA R. Flight dynamics simulation and control of aircraft: rigid and flexible[M]. Boca Raton, US: CRC Press, 2014.
- [19] 张强,蒋天俊,张建. 民用飞机机组工作量评价方法研究[J]. 硅谷, 2010, 14: 92-95.
ZHANG Qiang, JIANG Tianjun, ZHANG Jian. Research on workload evaluation method of civil aircraft crew [J]. Silicon Valley, 2010, 14: 92-95. (in Chinese)
- [20] 韩意新,方自力,李艺海. 典型PIO预测准则及试飞应用[J]. 科技创新与应用, 2017(7): 13-15.
HAN Yixin, FANG Zili, LI Yihai. Typical PIO prediction criteria and flight test application [J]. Technology Innovation and Application, 2017(7): 13-15. (in Chinese)
- [21] 王海涛. 空中加油动力学与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
WANG Haitao. Dynamics and control of aerial refueling [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)

作者简介:

张颖(1992—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞行力学,飞行试验技术等。

蒙泽海(1978—),男,硕士,研究员。主要研究方向:空气动力学,飞机性能试飞,前沿技术演示验证。

饶秋磊(1980—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行力学,飞行试验技术等。

何太(1990—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行力学,飞行品质等。

(编辑:马文静)