

11-30-2023

Analysis of Autonomous Aerial Refueling Capability Requirements and Key Evaluation Indicators

Quan Zou

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China; Key Laboratory of Flight Simulation Aeronautical Technology of AVIC, Xi'an 710089, China, zouquannjust@163.com

Yixin Hua

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China; Key Laboratory of Flight Simulation Aeronautical Technology of AVIC, Xi'an 710089, China

Zhu Shao

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China; Key Laboratory of Flight Simulation Aeronautical Technology of AVIC, Xi'an 710089, China

Wenbi Zhao

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Analysis of Autonomous Aerial Refueling Capability Requirements and Key Evaluation Indicators

Abstract

Abstract: From the perspective of flight tests, how to evaluate the autonomous aerial refueling (AAR) capability and select key indicators for evaluation is a key problem to be solved for AAR trials. The standards requirements of aerial refueling and manned aircraft aerial refueling experience in China and abroad are analyzed. The total capability of AAR is studied, and key evaluation indicators in the AAR whole process including rendezvous, formation, docking, refueling, and disengagement are proposed. The evaluation method is demonstrated in both numerical simulation and hardware-in-loop test environments. Finally, the key indicators affecting the docking success of AAR are analyzed, and suggestions for evaluation indicators are proposed. The test results can provide a reference for the process design and flight test verification of AAR.

Keywords

autonomous aerial refueling(AAR), capability requirements, docking process, evaluation indicators, hardware-in-loop(HIL)

Recommended Citation

Zou Quan, Hua Yixin, Shao Zhu, et al. Analysis of Autonomous Aerial Refueling Capability Requirements and Key Evaluation Indicators[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2385-2396.

自主空中加油能力需求及关键评价指标分析

邹泉^{1,2}, 华艺欣^{1,2}, 邵翥^{1,2}, 赵文碧³

(1. 中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089; 2. 航空工业飞行仿真航空科技重点实验室, 陕西 西安 710089; 3. 西北工业大学, 陕西 西安 710129)

摘要: 从飞行试验角度而言, 如何评价自主空中加油能力, 以及采用哪些关键指标进行评价是自主空中加油试飞亟待解决的关键问题。从国内外空中加油相关标准要求出发, 同时借鉴有人机空中加油的成功经验, 分析了自主空中加油总体能力需求, 提出了会合、编队、对接、加油及脱离等全过程关键评价指标, 在数值仿真和硬件在回路两种环境下对评估方法进行了试验验证, 结合试验结果, 对影响自主空中加油对接成功的关键因素进行了分析并提出了评价指标建议, 试验结果可为自主空中加油流程设计、试飞验证等方面提供参考和借鉴。

关键词: 自主空中加油; 能力需求; 对接阶段; 评价指标; 硬件在回路

中图分类号: TP391.9; V217 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)11-2385-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0655

引用格式: 邹泉, 华艺欣, 邵翥, 等. 自主空中加油能力需求及关键评价指标分析[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(11): 2385-2396.

Reference format: Zou Quan, Hua Yixin, Shao Zhu, et al. Analysis of Autonomous Aerial Refueling Capability Requirements and Key Evaluation Indicators[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2385-2396.

Analysis of Autonomous Aerial Refueling Capability Requirements and Key Evaluation Indicators

Zou Quan^{1,2}, Hua Yixin^{1,2}, Shao Zhu^{1,2}, Zhao Wenbi³

(1. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China; 2. Key Laboratory of Flight Simulation Aeronautical Technology of AVIC, Xi'an 710089, China; 3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: From the perspective of flight tests, how to evaluate the autonomous aerial refueling (AAR) capability and select key indicators for evaluation is a key problem to be solved for AAR trials. The standards requirements of aerial refueling and manned aircraft aerial refueling experience in China and abroad are analyzed. The total capability of AAR is studied, and key evaluation indicators in the AAR whole process including rendezvous, formation, docking, refueling, and disengagement are proposed. The evaluation method is demonstrated in both numerical simulation and hardware-in-loop test environments. Finally, the key indicators affecting the docking success of AAR are analyzed, and suggestions for evaluation indicators are proposed. The test results can provide a reference for the process design and flight test verification of AAR.

Keywords: autonomous aerial refueling(AAR); capability requirements; docking process; evaluation indicators; hardware-in-loop(HIL)

收稿日期: 2022-06-16 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 航空科学基金(20181353)

第一作者: 邹泉(1985-), 男, 高工, 硕士, 研究方向为飞行控制与飞行仿真。E-mail: zouquannjust@163.com

0 引言

自主空中加油 (autonomous aerial refueling, AAR)是指在人的监控下,实现有人/无人驾驶飞机的加油功能自动化。与传统有人机空中加油不同,在自主空中加油过程中受油机没有驾驶员的直接操纵,因此受油机与加油机的会合、编队、对接、加油、脱离等各个环节以及机动飞行,需要受油机在有限的自主权限下自动执行。

AAR不但可用于提升无人机的作战半径和作战效能,而且还可用于提升有人机在恶劣天气条件下进行空中加油的安全性和可操作性,大幅降低飞行员进行空中加油时的技术难度和工作负荷。2015年,X-47B无人机与一架K-707空中加油机完成自主空中加油试验,成为全球首架真正实现空中受油的无人机,开创了自主空中加油的新纪元;2021年,美国舰载无人加油机原型机MQ-25/T1完成了对F/A-18、F-22等有人机的空中加油试验,实现了“无人加油机”和“有人受油机”的自主空中加油^[1-3]。

国外AAR研究过程中利用多个试验项目及它机试验平台完成了自主加油关键技术演示验证。美国国防高级研究计划局先后利用F/A-18和VISTA/NF-16D变稳飞机作为受油机,完成了尾随位置/准备对接位置试飞、GPS和近距视频引导试飞、多余度自主编队飞控系统试飞、典型无人机模拟试飞等;美国空军研究实验室AFRL利用Learjet变稳飞机完成了7个空中加油位置试飞:对接位置,预对接位置,左翼内侧和左翼内侧观察位置,右翼内侧和右翼外侧观察位置,解散编队位置等^[4-5]。

虽然国内外针对AAR进行了大量的研究与验证工作,但是鲜见有关自主加油能力需求及关键指标评估方法方面的研究。本文主要通过分析有人机空中加油规范和标准,借鉴有人机空中加油试飞经验,提出AAR能力需求及关键评价指标建议,并通过数值仿真和硬件在回路(hardware-in-

loop, HIL)两种试验环境对自主空中加油全过程进行了仿真验证评价,最后给出自主空中加油评价指标建议。

1 自主空中加油分类及流程

目前空中加油有硬管、插头-锥管(软管)、混合(软硬结合)等方式。对于硬管式加油来说,实现自主空中加油的情形与自主式编队飞行类似,只需受油机拥有与加油机保持相对位置的能力即可,硬管对接可由加油机上的加油操作员操纵实现。而对于插头-锥管加油方式,受油机要负责整个加油过程中自身的飞行与控制,受油机不仅要拥有编队飞行的能力,而且还需要自主寻找加油锥套,不断实时获知锥套的位置及姿态,并向其不断靠近,确保对接成功,这无疑对受油机控制提出了很高的要求^[6]。

在有人机空中加油标准及流程方面,北约有人机空中加油程序ATP-56B统一了北约各国的空中加油程序,对会合、编队、对接、加油和脱离等各阶段都做出了详细的规定;国内针对有人机空中加油也制定了相应的标准和规范。GJB1398-92《插头-锥管式空中加油系统通用规范》规定了插头-锥管式空中加油系统的设计、安装和试验的一般要求^[7];GJB2885-97《插头-锥管式空中加油吊舱规范》规定了插头-锥管式空中加油吊舱的设计、安装和检验方面的要求,对吊舱内各个部件的性能要求及规格参数也做出了详尽的规定^[8];GJB3212-98《飞机燃油系统飞行试验要求》对飞机设计定型中燃油系统的地面试验和飞行试验要求、试验方法及结果评定做出了详实的规定^[9]。

对于无人自主空中加油来说,需要在有人机空中加油的基础上开展自主加油流程设计,借鉴有人机空中加油流程和相关规范,无人自主空中加油流程应满足以下基本原则:

- (1) 设备兼容。如受油机为插头,则加油锥管必须保证燃油冲击压力,燃油类型等也应当匹配;
- (2) 性能兼容。如加油飞机的飞行包线和加受

油包线能够安全完成空中加油任务,并具有一定的安全余量;

(3) 流程兼容。加油机执行预定计划时,如会合、编队、对接、加油和脱离等过程中,必须保证加受油程序与有人机空中加油兼容。

对于自主空中加受油流程还应考虑以下几点要求:

(1) 受油机在加油包线内稳定性和控制精度能够达到空中加油的使用要求,主要控制参数如高度、姿态、航向、侧偏等稳态控制精度满足使用

要求;

(2) 受油机加油包线应充分考虑飞行速度的安全裕度,建议选择速度稳定的控制点,采用相对固定的剖面进行空中加油,并参考有人机的要求设置高度、姿态等方面的限制和保护措施;

(3) 在自主空中加油设计过程中,需要对空中加油流程各个阶段转换条件及位置给出明确定义。

以给定的加油机和受油机为例,参考有人机空中加受油程序和标准,自主加受油流程示意如图1所示^[10]。

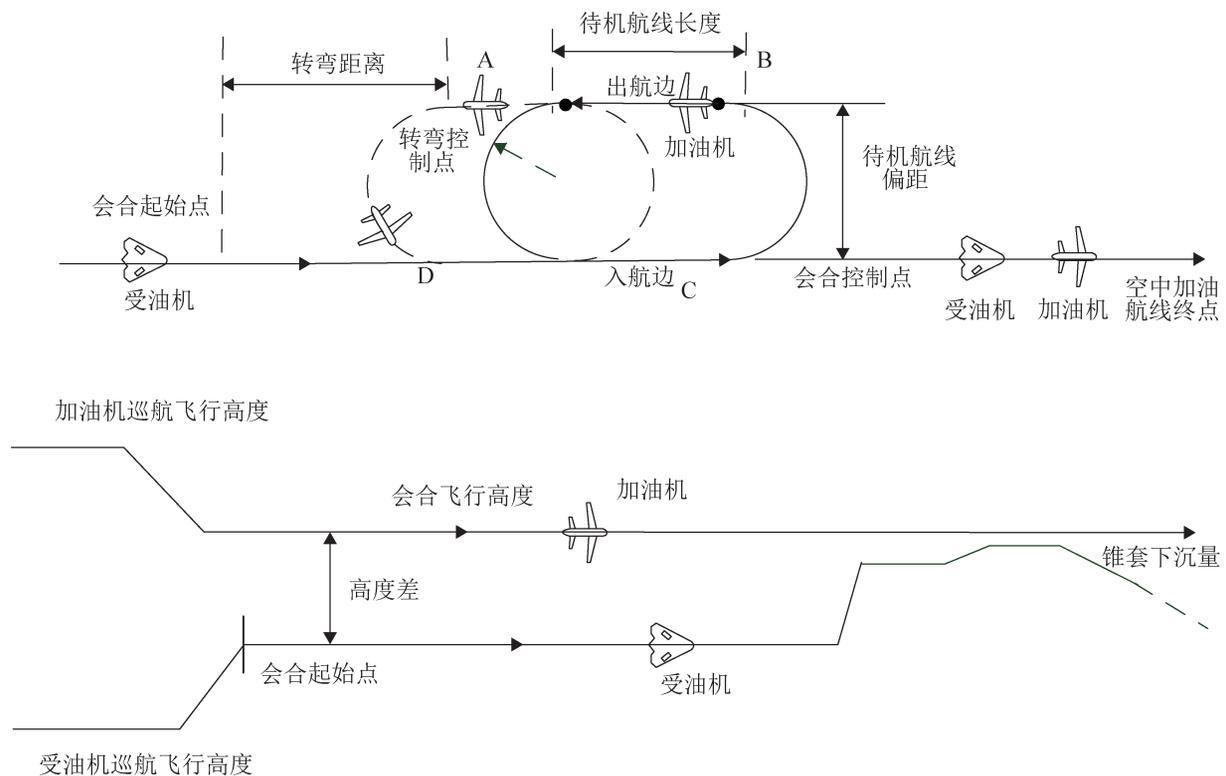


图1 自主加受油流程

Fig. 1 AAR process

自主加油步骤如下:

(1) 自主会合: 加油机根据飞行计划到达等待航线,以最省油的构型和速度沿等待航线飞行;受油机到达会合起始点之前,将飞行速度调整到会合速度,调整受油机高度至预设的会合高度,在自主会合阶段需要以最短的时间准确到达预定的空中加油控制点;

(2) 自主编队: 编队阶段主要作用是调整双机

距离、相对速度以及高度差。编队位置控制精度直接影响自主对接阶段的转换和编队效率;

(3) 自主对接: 加油编队保持正常,受油机以一定的相对速度到达对接位置。对接过程需要基于空中加油任务考虑对接成功概率和对接过程安全性;

(4) 自主加油: 自主对接完成后,受油机以一定速度到达加油区域后开始加油。加油过程需要

考虑加油过程的效率和安全性；

(5) 自主脱离：加油机完成加油后，受油机先减速，减小油门到慢车状态；到达自主加油航线终点之前，加油机上升到顶层高度，受油机下降到底层高度。此过程需要考虑脱离过程中的安全性和重新编队能力。

2 自主空中加油能力需求及关键指标分析

国外主要发达国家特别是美国，已经完成了自主空中加油验证试飞，其自主空中加油过程以通信安全、防撞安全等加油安全性要求为基础，围绕空中加油任务需求，从会合、编队、对接、加油与脱离等阶段制定自主空中加油程序，覆盖无人自主加油全过程。作为受油机，要求能在相应的有人/无人加油机所需的包线内操作，具备全自主的空中受油能力，包括自主会合、编队、对接、加油和脱离能力。

2.1 自主空中加油能力需求分析

参考有人机空中加油标准和规范，借鉴国外自主空中加油试验经验，根据空中加油的几个阶段，自主空中加油能力需求主要包括^[11-13]：

(1) 自主会合能力

能依据一定的自主会合程序规范，在不同态势、不同气象条件下，完成自主会合。自主会合过程除了会合程序要求的动作外，不应向加油机提出过多的工作负荷或程序要求，自主会合过程应具有可靠的防相撞措施，避免空中相撞，保证加油机和受油机的绝对安全。

(2) 紧密编队飞行能力

能借助差分卫星定位，结合其他导航方式(如惯导)实现紧密编队飞行，其控制精度应达到厘米级，能对各种扰动进行有效抑制，并能处理紧密编队飞行过程中各种意外或突发情况。

(3) 自主对接和加油能力

能精确控制受油机飞行轨迹并按照一定的对

接速度完成自主对接，对接过程中应能抑制各种扰动影响，并能有效处理各种突发情况。对接完成后应能精确保持加油位置，完成加油过程，能向加油机反馈自身加油量和飞行状态。

(4) 自主脱离能力

能自主判断自身加油量是否满足要求，满足后能自动给加油机提供加油情况的信息，在加油机批准后能启动自主脱离程序，自主脱离过程中应避免发生空中相撞，保证受油机和加油机的安全。在紧急情况下能应急脱离，并避免空中相撞。

(5) 任务管理能力

能对整个任务进行有效管理，包括自身燃油状态管理、空中加油申请、加油任务自主规划，以及按照标准的程序规范完成空中加油的会合、编队、对接、加油和脱离程序，并能有效应对各种突发情况。

2.2 自主空中加油能力评价关键指标

对于自主空中加油来说，能力评价主要包括自主加油能力和自主受油能力两个方面。

2.2.1 自主加油能力指标

自主加油能力指标主要包括空中加油效率、加油流量与加油时间、加油包线几部分。

(1) 空中加油效率

自主空中加油效率是指供油量与可用燃油之比。其中，供油量是指加油机在一定活动半径上所能提供的燃油量，通常采用单一活动半径的具体供油量值来表述，或给出不同活动半径下所能提供的燃油量要求序列；可用燃油为供油量与耗油量之和。

对于自主空中加油任务而言，加油机自身消耗的燃油尽可能少，这样可提供给受油机的燃油就尽可能多，从而提高自主空中加油效率。

(2) 加油流量与加油时间

加油流量是指加油过程中的燃油流量，也称为加油速率，通以L/min为单位。加油流量的选择受多方面因素的影响，主要与空中加油方式以

及受油对象等密切相关。

加油时间是指利用特定的加油设备给受油机进行空中加油时, 在受油机存在一定余油的情况下, 为受油机加满油(或规定油量)允许花费的最长时间(加油管输油的起止时间差), 它是整个空中加油系统综合能力的反映。

对于确定的加油系统和加油对象而言, 加油流量和加油时间指标一般而言是确定的。

(3) 加油包线

加油包线是指空中加油过程能够顺利进行的高度-速度范围, 通常空中加油包线应越大越好, 加油包线应与受油机工作包线相匹配。具体指标包括: 加油高度范围、加油速度范围。

2.2.2 自主受油能力指标

自主受油能力指标是空中加油区别于有人加油的主要方面, 其性能指标如表 1 所示, 主要包括以下几个方面:

(1) 总体能力指标

总体能力指标描述的是自主空中受油所应具有的总体性能指标, 主要包括: 受油机编队飞机数量、特定气象条件下对接成功率。

(2) 自主会合指标

对于 ATP-56B 规定的 7 种会合方式而言, 主要可以分为定时会合和定位会合两大类。据此, 会合阶段指标包括: 会合时间、到达会合控制点的控制精度。

(3) 自主编队指标

自主编队包括单机编队和多机编队, 自主编队指标主要包括: 编队位置保持精度、编队效率。

(4) 自主对接指标

自主对接是整个自主加油过程中的关键阶段, 直接关系到自主空中加油过程的成败, 自主对接指标主要从测量设备、对接及对接保持控制两方面来进行评价, 主要包括: 加受油机相对位置测量精度、相对对接速度、对接保持控制精度及对接保持时间。

(5) 自主加油及脱离指标

自主加油过程需要加受油机保持给定的加油编队位置, 同时自主脱离需要受油机根据脱离指令运动到给定的脱离位置, 自主加油及脱离指标主要包括: 加油编队位置保持精度、脱离编队位置保持精度。

(6) 其他能力指标

其他能力指标包括自主防撞能力指标等。

表 1 自主空中加油能力关键评价指标
Table 1 Key evaluation indicators of AAR

评价项目	评价指标
总体能力	受油机编队飞机数量 特定气象条件下的对接成功率
自主会合	会合时间 到达会合控制点的控制精度
自主编队	编队位置保持精度 编队效率
自主对接	加受油机相对位置测量精度 相对对接速度 对接保持控制精度 对接保持时间
自主加油及脱离	加油编队位置保持精度 脱离编队位置保持精度
其他	自主防撞能力等

3 自主空中加油能力评价仿真算例

针对给定的加油机和受油机, 本文选取不同的初始状态, 分别从自主会合能力、自主编队能力、自主对接能力等几方面在数值仿真和 HIL 两种试验环境下进行仿真分析和评价。HIL 试验环境如图 2 所示。

仿真条件设置如下: 待机航线长度(见图 1): 10 km; 编队位置: 两机水平距离 60 m, 侧向偏差 40 m, 高度方向偏差 6.9 m; 预对接位置: 两机水平距离 8 m, 侧向偏差及高度偏差为 0; 对接成功判据: 受油插头位于捕获半径 0.3 m 以内。

选定初始状态: 加油机 $H=6\ 000\text{ m}$, 空速 396 km/h ; 受油机 $H=5\ 992\text{ m}$, $v_k=396\text{ km/h}$, 期望的受油插头-软管锥套相对位置为前进方向 8 m, 侧偏为 0, 高度差为 0。



图2 硬件在回路试验验证环境
Fig. 2 HIL test environment

3.1 自主会合能力评估

不同初始位置(加油机会合起始点分别如图1所示跑马形会合剖面的4个顶点)情形进行数值仿真,选取自主会合指标中的会合时间进行评价。

一般而言,加油机飞行状态(包括运动轨迹在内)可以提前知道,根据ATP-56B会合程序的划分,无论是定时会合还是定位会合,均要求受油机从会合起始位置飞行到加油机后方某一位置(即会合控制点),同时实现与加油机高度、速度、航向的匹配。会合时间由受油机速度、转弯坡度、待机航线长度、待机航线偏距等变量决定,最长会合时间和最短会合时间分别计算如下:

最长会合时间为

$$t_{\max} = t_0 + t_1 + \pi R / V_1 \quad (1)$$

$$t_0 = (2\pi R + 2A) / V_1 \quad (2)$$

$$t_1 = (c - 3\pi R - 2A - x_0) / (V_1 + V_2) \quad (3)$$

$$R = V_1^2 / g \tan \Phi \quad (4)$$

最短会合时间为

$$t_{\min} = t_2 + t_3 \quad (5)$$

$$t_2 = (c - \pi R - x_0) / (V_1 + V_2) \quad (6)$$

$$t_3 = \pi R / V_1 \quad (7)$$

式中: A 为待机航线长度; R 为待机航线偏距; V_1 , V_2 分别为加油机和受油机初始会合速度; t_0 为会合起始前加油机刚过图1中A点位置等待受油机进入会合起始点所用时间; t_1 为加油机进入入航边时刻算起到会合控制点所用时间; t_2 为会合起始前加油机正好位于图1中A点位置从进入入航边时刻算起到会合控制点所用时间; φ 为加油机转弯坡度; c 为会合起始点和会合控制点之间的距离; x_0 为加油

机和受油机初始位置水平距离; 会合时间介于 t_{\min} 和 t_{\max} 之间。

不同加油机速度、转弯坡度、初始位置情况下的计划会合时间与实际会合时间试验结果如表2和图3所示。

表2 会合时间试验结果

Table 2 Autonomous rendezvous capability test results					
初始位置		A	B	C	D
速度/ (km/h)	坡度/ (°)	计划会合时间/实际会合时间/s			
396	20	334/357	318/325	283/307	408/425
432		345/367	324/351	269/282	400/437
396	30	335/353	311/319	272/298	375/411
432		321/342	300/312	257/269	364/390

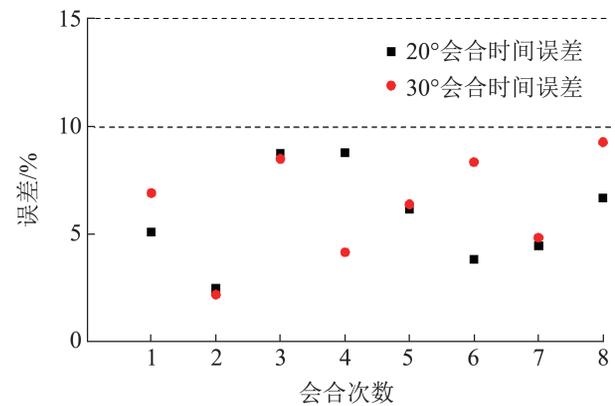


图3 会合时间误差对比

Fig. 3 Autonomous rendezvous evaluation test result and rendezvous time

从表2和图3试验结果可以看出,在20°和30°转弯坡度下实际会合时间与计划会合时间(也称之为期望会合时间)之差均在10%以内,实际会合时间与转弯坡度和初始位置关系较大。

3.2 自主编队能力评估

编队完成时,一般要求受油机位于加油机后方某一距离,该距离与加油机尾涡流场有关,高度差与锥套下沉量有关,加受油机翼尖距离不小于受油机翼展。对于自主空中加油编队阶段,机翼(翼侧)和尾随编队两种形态都可利用,其主要控制目标就是保持加油机和受油机之间的相对位置。针对两种编队形态选取机翼编队位置和尾随编队的预对接位置进行仿真实验。选取自主编队指标

中的编队位置保持精度进行评价。

自主编队位置保持试验结果如图 4, 5 所示, 从图中可以看出, 高度方向和侧偏方向位置保持能力较好, HIL 环境下编队位置保持精度要稍差于数值仿真环境下的编队位置保持精度。

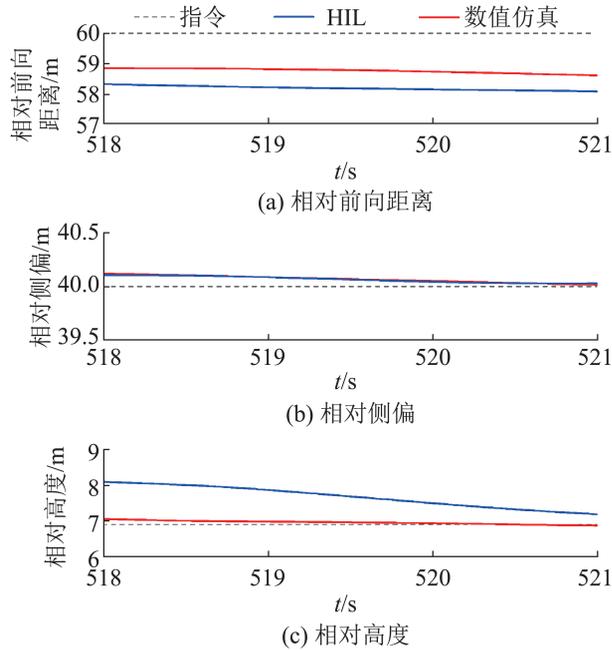


图4 编队位置

Fig. 4 Autonomous formation capability evaluation test and formation position

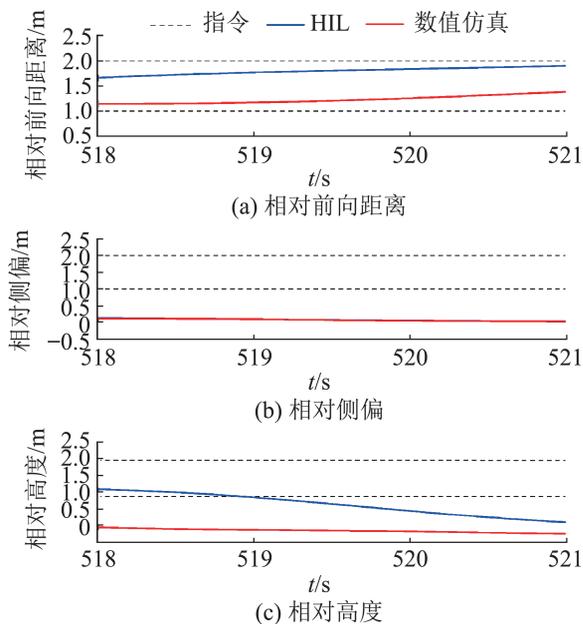


图5 编队位置误差

Fig. 5 Autonomous formation capability evaluation test and formation position error

自主预对接位置保持试验结果如图 6, 7 所示, 试验结果表明, 预对接位置前向距离保持精度要优于自主编队位置保持的前向距离保持精度; 侧偏控制精度要优于高度控制精度, 但是都处于给定的捕获半径 0.3 m 以内。

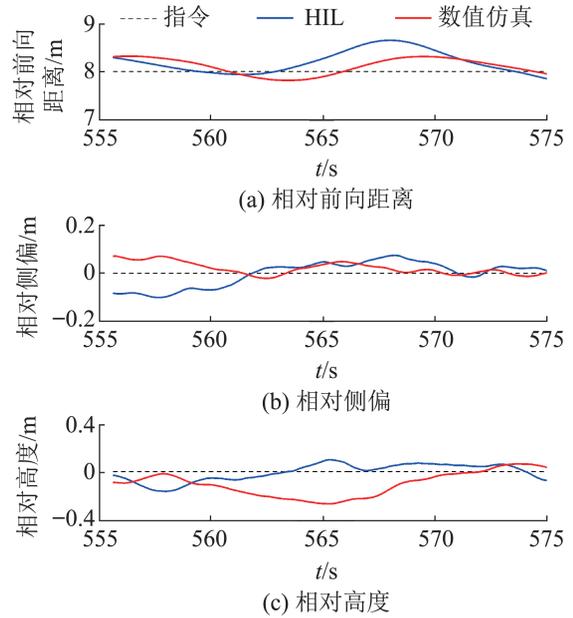


图6 预对接位置

Fig. 6 Autonomous formation capability evaluation test and pre-docking position

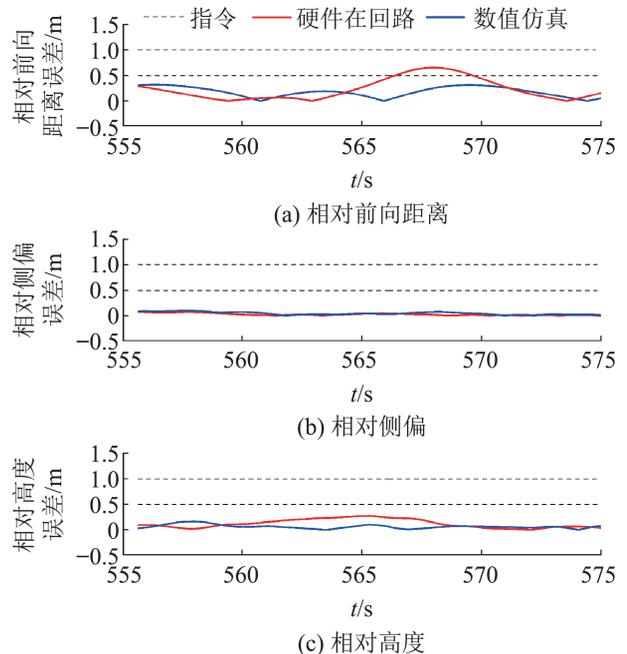


图7 预对接位置误差

Fig. 7 Autonomous formation capability evaluation test and pre-docking position error

3.3 自主对接能力评估

选取自主对接评价指标中的相对对接速度进行评价。

加油机和受油机相对对接速度分别设置为 $v_1=0.6$ m/s, $v_2=1.2$ m/s, $v_3=1.8$ m/s, $v_4=2.4$ m/s, 完成不同相对对接速度下的对接能力试验; 采用Dryden紊流模型, 紊流强度分别设置为轻度紊流、中度紊流和重度紊流, 完成不同紊流强度下的对接能力试验。

数值仿真试验结果如图8~10所示。试验结果表明, 轻度紊流情况下, 相对对接速度在0.6~1.8 m/s范围内都能成功对接, 相对速度2.4 m/s的情况下对接失败; 在中度紊流情况下, 相对对接速度在0.6~1.2 m/s范围内都能成功对接, 相对速度1.8~2.4 m/s的情况下对接失败; 在重度紊流情况下, 相对对接速度在0.6 m/s范围内能成功对接; 相对速度1.2~2.4 m/s的情况下对接失败, 距锥套1.5 m范围内插头-锥套径向距离达到了0.8 m, 存在飞行安全隐患。

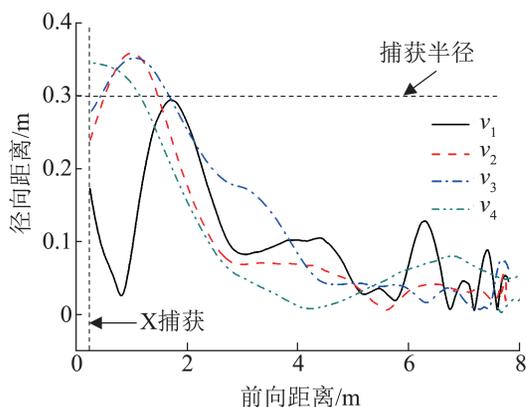


图8 轻度紊流对接能力试验结果

Fig. 8 Autonomous docking capability evaluation test under light turbulence and different velocities

从试验结果可以看出, 相对对接速度过大, 在成功对接锁定后减速过程所需要的距离也较大, 容易超出加油安全区域; 另外, 紊流强度对软管运动影响较大, 进而影响插头-锥套径向距离。根据数值仿真试验结果, 结合有人机空中加油试验数据, 推荐自主空中加油相对对接速度范围为

0.6~1.5 m/s、轻度和中度紊流情况下进行自主加油试验, 不建议在重度紊流情况下进行自主加油试验。

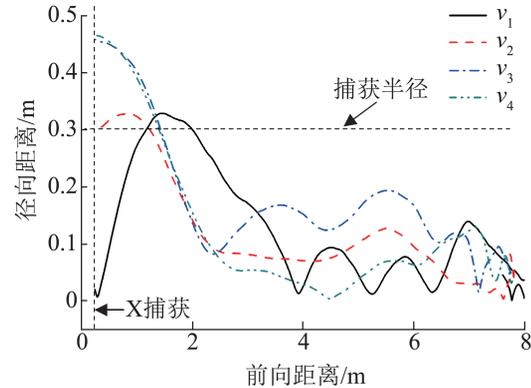


图9 中度紊流对接能力试验结果

Fig. 9 Autonomous docking capability evaluation test under medium turbulence and different velocities

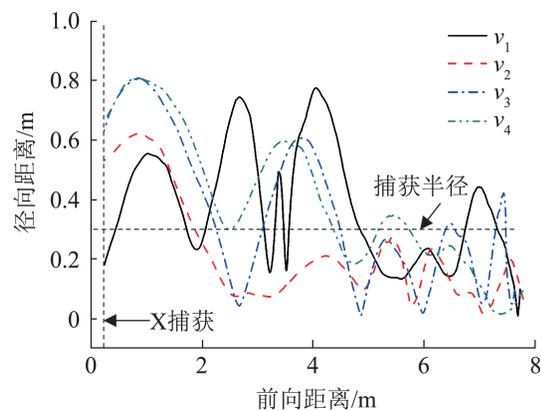


图10 重度紊流对接能力试验结果

Fig. 10 Autonomous docking capability evaluation test under severe turbulence and different velocities

3.4 自主对接总体能力评估

一般情况下, 参照有人机空中加油经验, 准许进行对接时, 受油机建立一定的接近速率接近加油锥套并尝试进行对接。如果能成功地对接上加油锥套, 受油机需稳定地保持大约30 s。如果接近速率过大, 受油头端梢就会穿过加油锥套的外边缘, 受油头会使锥套倾斜。如果产生了风险情况, 就要中断对接尝试, 并且在进行下一次尝试之前, 要回到预对接位置, 推荐的尝试次数为6~12次。

完成不同速度、不同紊流强度下的对接成功率试验 6 次。选取自主对接总体评价指标中的对接成功率进行评价。试验结果如表 3 所示, 可以看出: 在轻度紊流情况下对接成功率较高, 均在 83% 以上; 而在中度紊流情况下对接成功率较差。

表 3 对接成功率试验结果(成功次数/对接次数)
Table 3 Docking success probability (success numbers/
docking numbers)

紊流强度	相对速度/(m·s ⁻¹)			
	0.6	0.9	1.2	1.5
轻度紊流	5/6	6/6	6/6	5/6
中度紊流	4/6	4/6	4/6	3/6

4 自主对接关键影响因素分析

对接过程是软式自主空中加油过程的核心, 是控制精度、加油安全和效率要求最高且实现难度最大的控制过程。因此, 自主对接成功与否是自主空中加油成功的关键, 影响对接成功的因素主要有相对对接速度、紊流及流场影响、锥套捕获半径、受油插头-锥套位置测量等几方面。

4.1 相对对接速度

国外军用标准 MIL-A-19736 《空中加油系统通用规范》规定“对接时, 受油机的飞行速度大于加油机的飞行速度, 但不大于 10 ft/s(约 3.1 m/s); 对接速度低至 2 ft/s(约 0.61 m/s)时, 响应作用不应妨碍受油插头与加油接头完成对接”, 国内相关标准规定“空中加油时对接速度应在 0.6~3.0 m/s, 锥套在全拖曳位置下沉量为 1.5~2.5 m, 锥套在全拖曳位置的摆动量为 250 mm, 超过这些指标均不能进行对接”。从图 8~10 的试验结果也可以看出, 对接速度直接影响对接是否成功。

对于自主空中加油而言, 可以借鉴并参考有人机空中加油飞行试验数据, 同时考虑自主对接与加油过程中的安全性, 选取合适的相对对接速度范围并进行完整的试验验证。

4.2 紊流及流场影响

从图 8~10 和表 3 可以看出, 紊流强度也是影响对接是否成功的一个关键因素, 紊流强度越大, 导致加油锥套-受油插头径向距离也越大, 影响飞行安全和任务完成率。

流场影响主要是加油机尾流和受油机头波流场影响。在加油机尾流和受油机头波的耦合作用下, 软管锥套组合体飘摆现象呈现出非定常、非线性、快时变、强耦合的系统特征, 这给自主空中加油精确对接控制带来了极大的难题^[14-16]。图 8~10 的试验结果表明在接近加油锥套的 2 m 范围内, 头波效应比较明显。

4.3 锥套捕获半径

自主对接是否成功还与对接域中的锥套捕获半径的选择有关。以受油插头和加油锥套径向距离为对接成功与否的判断条件: 当受油机距离锥套位置径向距离处于捕获半径所在圆范围之内时, 则可进入捕获位置; 当受油机距离锥套位置径向距离处于捕获半径所在圆范围之外时, 则此次对接是失败的, 返回初始跟踪位置, 重新进行对接^[17-19]。

判别是否与锥套对接成功需要考虑加油锥套的实际大小尺寸。图 8~10 的试验过程中给定的锥套捕获半径为 0.3 m(对应的锥套半径为 375 mm); 若加油机锥套尺寸改变(与选定的加油机对象有关), 则图 8~10 的试验结论需要重新进行评估。

4.4 受油插头-锥套位置测量

目前在自主对接阶段用于精确测量受油插头-锥套位置的主要有被动视觉、主动视觉和激光导航测量。

被动视觉系统是在被测物体上有规则地安装红外发光二极管, 传感器(相机)获得发光管的图像, 经处理后得到相对导航信号; 主动导航系统具有高精度数据测量生成能力, 不需要具有很强计算能力的图像处理系统, 它通过将光学传感器与主动光源或信号灯结合, 可实时生成三自由度

相对导航信息；激光导航系统相较于视觉(无论是被动还是主动)定位而言具有更好的大气环境适应性(如云、雾等影响)，但激光导航装置技术成熟度较低，目前还处于实验室验证阶段^[20-23]。

无论是被动视觉、主动视觉还是激光导航装置，其测量精度必须在厘米级范围内^[24-25]，从图8~10可以看出，受油插头-锥套位置测量精度直

接影响自主对接的成功与否。

5 自主空中加油能力评价指标建议

借鉴有人机空中加油标准和经验，考虑自主空中加油使命任务和能力，参照有人机飞行品质评价标准原则，根据上述试验结果可对自主空中加油关键参数评价准则提出建议，如表4所示。

表4 自主空中加油关键参数评价指标建议
Table 4 Key evaluation indicator suggestions of AAR

评价指标	期望的	合适的	备注
总体指标 对接成功率	轻度紊流情况下,至少在尝试对接的83%次数里,在不触及锥套织边情况下能够对接上,且没有PIO(pilot induced oscillation)现象	轻度紊流情况下,至少在尝试对接的67%次数里能够对接上	中度紊流可以适当放宽
自主会合 会合时间	实际会合时间与期望会合时间之差在10%范围内	实际会合时间与期望会合时间之差介于10%~15%范围内	
自主编队 编队位置保持精度	偏离编队位置的偏差量不大于1 m,且没有PIO现象	偏离编队位置的偏差量不大于2 m	适用于近距离编队,远距离编队可以适当放宽

6 结论

本文根据自主空中加油特点，分析了有人机空中加油标准和试飞过程中的相关经验，提出了总体能力需求和各阶段关键指标，针对关键阶段即对接阶段的对接速度、紊流强度、捕获半径等关键影响因素，在数值仿真和硬件在回路两种环境下进行了试验评价，并提出了自主空中加油关键指标评价准则建议，下一步将对自主空中加油其他关键影响因素如精确导航传感器性能、自主对接控制性能等展开更深的研究与试验验证。

参考文献：

- [1] 廖南杰. MQ-25无人机完成首次空中供油试验[N]. 中国航空报, 2021-07-06(A09).
- [2] 钟德星, 李永强, 李严稷. 无人机自主空中加油技术现状及发展趋势[J]. 航空科学技术, 2014, 25(5): 1-6. Zhong Dexing, Li Yongqiang, Li Yanrui. State-of-the-art and Tendency of Autonomous Aerial Refueling Technologies for Unmanned Aerial Vehicles[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(5): 1-6.
- [3] 李明. 美国海军舰载无人空中加油系统项目及动力[J]. 航空动力, 2018(2): 40-44.

- Li Ming. U. S. Navy Carrier-based Unmanned Tanker MQ-25 and It's Engine Selection[J]. Aerospace Power, 2018(2): 40-44.
- [4] Dibley R P, Allen M J, Dr Nassib Nabaa. Autonomous Airborne Refueling Demonstration Phase I Flight-test Results[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2007: AIAA 2007-6639.
- [5] Ro K, Basaran E. Aerodynamic Investigations of Paratroque Assembly in Aerial Refueling System[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2006: AIAA 2006-855.
- [6] 全权, 魏子博, 高俊, 等. 软管式自主空中加油对接阶段中的建模与控制综述[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2390-2410. Quan Quan, Wei Zibo, Gao Jun, et al. A Survey on Modeling and Control Problems for Probe and Drogue Autonomous Aerial Refueling at Docking Stage[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(9): 2390-2410.
- [7] 国防科学技术工业委员会. 插头-锥管式空中加油系统通用规范: GJB 1398-92[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1993. The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. In-flight Refuelling System, Type Probe and Drogue, General Specification for: GJB 1398-

- 92[S]. Beijing: The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1993.
- [8] 国防科学技术工业委员会. 插头-锥管式空中加油吊舱规范: GJB 2885-97[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.
The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Air to Air Refuelling (AAR) Pod Type of Probe and Drogue, Specification for: GJB 2885-97[S]. Beijing: The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1997.
- [9] 国防科学技术工业委员会. 飞机燃油系统飞行试验要求: GJB 3212-98[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1998.
The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Flight Test Requirements for Aircraft Fuel System: GJB 3212-98[S]. Beijing: The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 1998.
- [10] 华艺欣, 邹泉, 田海铭. 软式自主空中加油控制策略仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(2): 262-270.
Hua Yixin, Zou Quan, Tian Haiming. Control Strategy and Simulation for Probe-and-drogue Aerial Autonomous Refueling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(2): 262-270.
- [11] 潘科, 潘宣宏, 郭新奇, 等. 空中加油机作战效能设计参数的主成分分析[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(4): 21-24.
Pan Ke, Pan Xuanhong, Guo Xinqi, et al. Principal Component Analysis on Design Parameters of Aerial Refueling Aircraft Operational Effectiveness[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(4): 21-24.
- [12] 陈乐乐, 刘学强. 不同对接速度下软式加油管锥套运动特性数值模拟研究[J]. 空气动力学学报, 2017, 35(1): 115-122.
Chen Lele, Liu Xueqiang. Dynamic Characteristics Analysis of Refueling Drogue at Various Docking Velocities[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2017, 35(1): 115-122.
- [13] 陆宇平, 杨朝星, 刘洋洋. 空中加油系统的建模与控制技术综述[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2375-2389.
Lu Yuping, Yang Chaoxing, Liu Yangyang. A Survey of Modeling and Control Technologies for Aerial Refueling System[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(9): 2375-2389.
- [14] 王健, 董新民, 徐跃鉴, 等. 软式空中加油受油机头波数值仿真分析[J]. 飞行力学, 2016, 34(1): 54-58.
Wang Jian, Dong Xinmin, Xu Yuejian, et al. Simulation and Analysis of the Bow Wave Effect of the Receiver in Hose-drogue Aerial Refueling[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(1): 54-58.
- [15] 王海涛, 董新民. 空中加油动力学与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 56-63.
- [16] 徐坚, 张晓非. 软式空中加油头波效应建模与仿真[J]. 飞行力学, 2019, 37(5): 40-44.
Xu Jian, Zhang Xiaofei. Dynamic Modeling and Simulation of Bow Wave Effect in Hose-drogue Aerial Refueling System[J]. Flight Dynamics, 2019, 37(5): 40-44.
- [17] 谢磊, 孙绍山, 金智, 等. 无人自主空中加油相对引导技术[N]. 中国航空报, 2018-11-01(A05).
- [18] 张博连. 无人机自主空中加油对接控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Zhang Bolian. Docking Control Method for Autonomous Aerial Refueling for Unmanned Aerial Vehicles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [19] 陈娟, 赵君伟, 付永领, 等. 受油机运动模拟系统设计与建模仿真分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(15): 10-14.
Chen Juan, Zhao Junwei, Fu Yongling, et al. Design and Modeling Simulation Analysis of Motion Simulation System of Refueled Aircraft[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(15): 10-14.
- [20] 秦勇, 王宏伦, 苏子康, 等. 基于视觉的自主空中加油锥套检测与跟踪[J]. 战术导弹技术, 2016(6): 2390-2410.
Qin Yong, Wang Honglun, Su Zikang, et al. Drogue Detection and Tracking Based on Vision for Autonomous Aerial Refueling[J]. Tactical Missile Technology, 2016(6): 2390-2410.
- [21] 李柱. 基于双目视觉的无人机自主空中加油对接导航方法[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
Li Zhu. Binocular-vision-based Docking Navigation Method for UAV Self-refueling[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [22] 单尧. 空中加油对接系统视觉处理与飞行验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Shan Yao. Research on Detection Identification Algorithm of Drogue Images and Flight Verification[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [23] 周清, 许悦雷, 加尔肯别克. 无人机软管式自主空中加油视觉导航技术[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(1): 40-47.
Zhou Qing, Xu Yuelei, Jia Erkenbieke. Visual Navigation Technology for UAV Autonomous Hose-drogue Aerial Refueling[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(1): 40-47.
- [24] 解洪文, 王宏伦. 基于双目视觉的自动空中加油近距导航方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 206-209.
Xie Hongwen, Wang Honglun. Binocular Vision-based

Short-range Navigation Method for Autonomous Aerial Refueling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(2): 206-209.
[25] 纪超, 王庆. 基于双目视觉的自主空中加油算法研究与

仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(6): 1327-1331.
Ji Chao, Wang Qing. Stereo Vision System and Simulation for Autonomous Aerial Refueling[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(6): 1327-1331.