

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.06.016

无人机空中回收气动干扰与对接路径研究

冯路启¹, 钟林龙¹, 李家旭², 刘学强¹

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 陕西飞机工业有限责任公司, 汉中 723213)

摘要: 针对采用空中平台进行直接对接的新型无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)回收方法进行了气动干扰仿真与对接路径研究。在对接回收过程中, UAV 需要从远方逐渐接近空中平台。在 UAV 靠拢平台的过程中, 会受到平台翼尖尾涡的影响。如何使 UAV 以正确的路径接近空中平台是能否成功回收的关键。主要从气动特性方面出发, 首先通过计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)仿真研究分析了 UAV 沿不同路径与空中平台进行对接回收时的气动性能变化规律, 然后使用代理模型对产生的气动干扰进行拟合分析, 得出 UAV 气动干扰在空中平台周围的空间分布。随后针对不同对接路径的气动干扰, 使用 MATLAB 构建了一种抗干扰滑模控制器, 并对不同路径下的对接过程进行对比仿真实验。研究结果表明, 进近对接过程中 UAV 从平台前方向后方减速接近平台时气动性能最为稳定。

关键词: 无人机空中对接; 空中回收平台; 无人机编队飞行; 计算流体力学仿真; 滑模控制

中图分类号: V211.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)06-1124-10

Research on Aerodynamic Interference and Docking Path of UAV Aerial Recovery

FENG Luqi¹, ZHONG Linlong¹, LI Jiaxu², LIU Xueqiang¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shaanxi Aircraft Industry limited Liability Company, Hanzhong 723213, China)

Abstract: The aerodynamic simulation and path optimization of a new unmanned aerial vehicle (UAV) recovery method using an aerial platform for direct docking are carried out. In the docking and recovery process of this method, the UAV needs to gradually approach the aerial platform from a distance. In the process of approaching the platform, the UAV will be affected by the tail vortex of the platform's wing tip. How to ensure the correct path of the approaching is the key to a successful recovery. This paper starts from aerodynamic characteristics. First, computational fluid dynamics (CFD) simulation is used to study and analyze the variation rule of aerodynamic performance when the UAV is docking and retrieving with the air platform along different paths. Second, the proxy model is used to fit and predict the generated aerodynamic interference, and the spatial distribution of the UAV aerodynamic interference around the air platform is obtained. Third, an anti-interference sliding mode controller is designed with MATLAB to deal with the aerodynamic interference under different docking paths, and the docking paths under the corresponding paths are compared and verified by simulation.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV) docking; aerial recovery platforms; drone formation flying; computational fluid dynamics (CFD) simulation; sliding model control

收稿日期: 2024-07-20; 修订日期: 2024-10-14

通信作者: 刘学强, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: liuxq@nuaa.edu.cn.

引用格式: 冯路启, 钟林龙, 李家旭, 等. 无人机空中回收气动干扰与对接路径研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 1124-1133. FENG Luqi, ZHONG Linlong, LI Jiaxu, et al. Research on aerodynamic interference and docking path of UAV aerial recovery[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 1124-1133.

固定翼无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)飞行速度快,载重能力强,但对起降环境要求较高,同时降落与回收需要专门的机场跑道。为了提升固定翼UAV巡航效率,扩展固定翼UAV的应用场景,以UAV空中充电和UAV空中回收为代表的UAV空中对接技术受到人们关注^[1-2]。

国内外针对UAV空中对接回收技术已有大量研究。在20世纪50年代,美国空军为了增加喷气式战斗机的航程,提出复合式运输(Compound aircraft transport, CAT)的概念,采用翼尖停靠的方式,将两架F-84战斗机与大型飞机对接,到达目的地后发动机重启以节省燃料,该项目成功完成了飞行测试^[3]。美国国防部高级研究计划局正在研发“小精灵”项目,试图用C-130多用途飞机投放小型UAV机群,然后用其他C-130飞机尽可能多地回收这些UAV。

但如何应对C-130载机附近的复杂紊流,以及机械臂末端抓取机构的设计是回收系统需要解决的2个难题^[4]。Bangash等^[5]研究了UAV编队飞行过程中气动干扰产生的影响因素,并研究了不状态下双机编队飞行时升阻比的变化规律。针对UAV精确运输的问题,Caruso等^[6]提出了快速UAV运输系统(Rescue-delivery, RED),该系统使用固定翼母机和多旋翼UAV的组合,能够快速、准确和自主地将有效载荷从基地运送到指定地点,然后返回到起始位置。Suvama等^[7]针对旋翼UAV空中回收与释放的问题提出了一种复合式UAV系统,利用一种创新性的对接机制,使飞艇可以携带、部署、回收和补给小型四轴UAV,并对UAV进行充电。飞行试验的结果表明,系统能够满足甚至超过所需的任务能力。UAV空中充电方面,Wang等^[8]设计了一种小型空中供电装置。UAV采用双机编队的飞行方式,其中一架UAV在前方拖曳线缆锥套,另一架UAV从后方对接。他们使用2架小型UAV进行空中实验,并成功进行了空中对接和模拟充电。Nichols等^[9]提出了一种用于小型UAV的空中交互方法,通过一个被动拖曳的锥套系统引导到小型UAV的飞行轨道上来实现交会对接。他们的研究表明,通过控制母机的空速和轨迹来控制对接轨道是可行的,并基于视觉分析系统设计了一套控制方法。

目前国内UAV对接领域的研究主要集中在空中加油与小型固定翼UAV的回收技术^[10-12]。李俊国^[13]对UAV撞线回收方式开展研究,设计了蜂群式固定翼UAV空基回收系统,包括机身融合天钩技术研究和UAV末段精确导引技术研究等。

苏子康等^[14]针对小型固定翼UAV远程作战空基回收问题提出一种伸缩套臂式抓取UAV空基回收方法,采用转动惯量质量投影法及拉格朗日方程法构建伸缩套臂仿射非线性模型,继而分析了母机尾涡及常值风扰动综合作用下伸缩套臂的气动特性。王宏伦等^[15]针对UAV拖曳式空中回收过程中的轨迹优化问题,建立了包括缆绳-浮标-UAV组合体运动模型、机翼折叠模型在内的空中回收系统模型,提出了一种基于轨迹映射的UAV回收轨迹在线优化方法。王辉等^[16]使用空中视觉引导高动态空中对接,大幅度增强了关联目标的检测性能。

目前UAV空中回收大多采用拖曳线缆和机械臂抓取的对接回收方式,直接进行空中滑行对接的研究还相对较少。本文针对一种基于空中平台的双机交汇对接回收模式进行研究,该模式下产生的问题主要为如何使UAV能顺利稳定地绕过空中平台的尾流区,并在稳定的控制状态下着陆在空中平台上。本文首先分析了空中平台与UAV双机编队飞行过程中的气动干扰,得出空中平台翼尖涡的扩散规律与影响范围。之后分别对UAV以不同路径向起降平台进行对接着陆的气动性能进行计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)仿真计算,并使用代理模型拟合其他位置的气动干扰。最后针对UAV在预定路径下进行对接所产生的干扰设计了一种滑模控制器,使用MATLAB Simulink对不同路径下的UAV与空中平台的进近对接过程进行了仿真实验,对比分析得出了UAV最佳对接路径。

1 UAV控制平台对接回收技术

空中平台对接回收是一种新型的UAV空中回收方法。UAV首先从远方接近至空中平台周围某一相对位置并保持编队飞行,随后UAV从空中平台前方或后方逐渐向空中平台进近,待UAV与空中平台上表面接触后,无人起落架与平台上方甲板固定,UAV与平台完成对接。

平台采用中单翼布局,双机身构型可用于减缓UAV着陆对接过程中的冲击力,机身背部布置全通式跑道,用于回收和固定UAV。空中平台上表面无任何突出部位,因此UAV在着陆对接过程中可从平台前方或后方以任意路径向预计着陆点进近。平台外形示意图如图1所示。

待回收UAV为常见的中型固定翼UAV,待回收UAV外形示意图如图2所示。

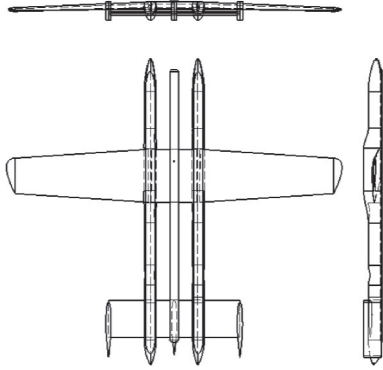


图1 空中回收平台三视图

Fig.1 Three views of the air recovery platform

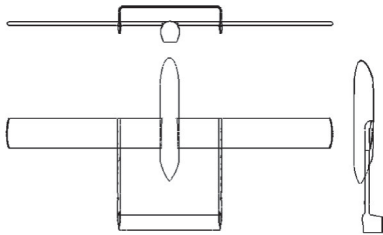


图2 UAV外形示意图

Fig.2 Schematic diagram of shape of UAV

UAV与空中平台的对接示意图如图3所示。

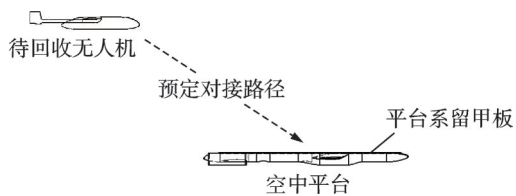


图3 UAV与空中平台对接示意图

Fig.3 Three views of UAV and air platform docking

在UAV对接过程中,UAV会受到空平台产生的翼尖涡干扰。如何选择合适的对接路径,使UAV在对接过程尽可能地避免受到气动干扰是UAV空中回收过程中所需解决的关键问题。

2 计算方法

2.1 CFD计算方法

本文中主要采用CFD方法进行计算。计算过程主要为求解雷诺平均N-S方程(Reynolds average Navier-Stokes equations, RANS)。湍流模型采用Spalart-Allmaras单方程模型,空间离散格式为基于roe格式的二阶迎风格式。

针对本文的空中平台与待回收UAV进行网格无关性验证。网格类型选择混合网格,对不同网格数量下的UAV算例作阻力系数验证,如表1所示。由表1可知,本文所使用的UAV与空中平台几何模型,当网格数量达到700万级时,计算结果

表1 计算网格无关性验证

Table 1 Computation grid independence verification

空中平台		UAV	
网格数量	阻力系数	网格数量	阻力系数
4 089 956	0.193 5	3 040 402	0.048 5
5 452 154	0.191 4	5 070 997	0.045 7
7 710 264	0.190 1	7 300 634	0.044 3
11 841 988	0.189 9	11 759 704	0.044 1

随网格数量变化量较小,能够达到本文所需计算精度。接下来的仿真计算网格均以此为最低网格密度。

采用1:10比例风洞模型对空中起降平台进行对比验证。风洞实验与仿真计算的环境参数对比计算如表2所示。

表2 实验验证参数

Table 2 Experimental verification parameters

参数	风洞实验	仿真计算
来流速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	24.9	25
空气密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.222	1.225
动态黏度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.789 38e-5	1.789 38e-5
特征长度/m	0.146	0.145
Re	248 268	248 165

表2所示风洞实验环境参数与仿真计算参数基本一致,缩比模型与数学模型雷诺数相差较小。为测定风洞来向的气流参数,同时将空中平台连接固定在风洞底座上,需要在模型中心增加一个连杆锥套,连杆锥套实物与锥套位置示意图分别如图4和5所示。



图4 实验模型支撑系统

Fig.4 Experimental model support system

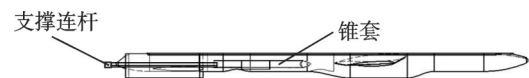


图5 连杆锥套相对位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of relative position of connecting rod cone sleeve

使用700万级网格仿真计算验证空中平台的升阻力特性,计算与实验结果对比如图6所示。由图6可知,本文CFD仿真计算结果曲线与风洞实验结果曲线基本吻合。

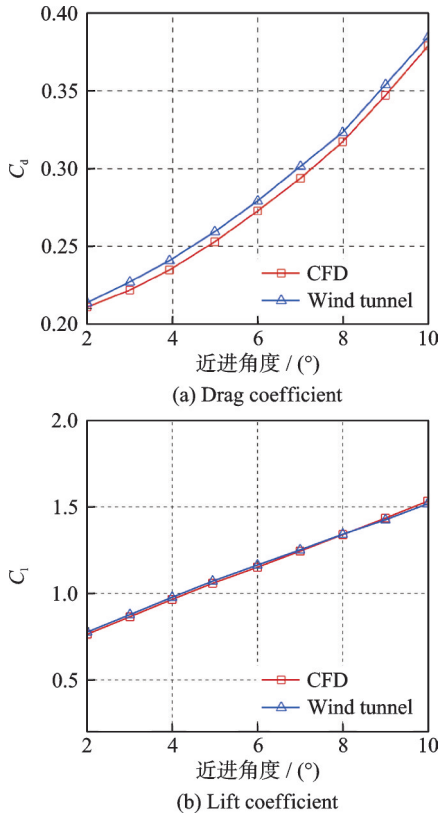


图 6 计算与风洞实验升阻力系数对比
Fig.6 Comparison of lift and drag coefficients between CFD and wind tunnel experiment results

由图 6 可知,升力系数与实验结果相符,阻力系数实验结果相比计算结果略大,考虑是由于实验数据未去除支撑装置干扰所至。说明本文计算方法能够达到一定的精度要求。

2.2 基于代理模型的气动力数据建模

使用代理模型拟合建模空中平台与 UAV 不同相对位置下的气动干扰。神经网络算法是一种新兴的代理模型数值拟合方法,其中反向传播 (Back propagation, BP) 神经网络是一种按误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络,为目前使用最为广泛的神经网络之一,在工程实际值中常被应用于拟合预测研究。其结构如图 7 所示。神经网络模型的构建包括输入层、隐藏层和输出层。本文使用 UAV 在空中平台周围的相对位置信息作为神经网络的输入;输出为 UAV 所受到的气动干

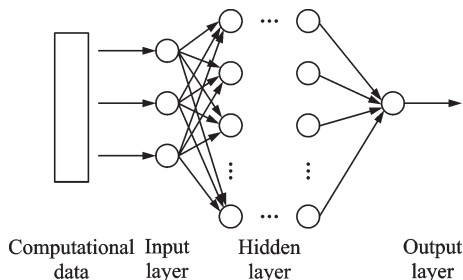


图 7 BP 神经网络结构示意图
Fig.7 BP neural grid structure diagram

扰。训练样本为不同相对位置下的 CFD 计算数据。通过代理模型可以得到其他不同相对位置下的 UAV 气动干扰,以此用于不同路径下对接过程中的 UAV 气动力方程求解。

2.3 UAV 仿真控制方法

本文在 MATLAB Simulink 环境下进行 UAV 运动状态仿真计算。考虑 UAV 对接降落的特殊性,采用比例积分微分 (Proportional integral derivative, PID) 和滑模控制 (Sliding mode control, SMC) 联合控制方法。考虑 UAV 在对接过程中会受到非线性的气动力扰动,因此 UAV 俯仰角与 UAV 升降舵面的控制采用抗干扰性能较强的 SMC。通过改变 UAV 的俯仰角可改变 UAV 整体产生升力的大小,进而改变 UAV 的下降速度。经过调节后的 PID 控制器可根据不同的下降速度输入产生相应的姿态角指令,姿态角指令再由 SMC 控制器转化为相应的升降舵偏量,由此可控制 UAV 的下降速度,进而控制 UAV 对接轨迹,控制系统模拟运行流程图如图 8 所示。

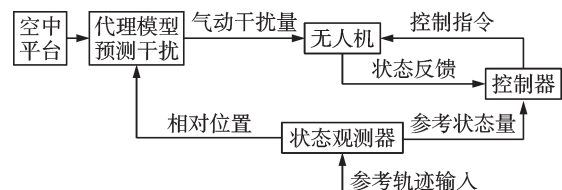


图 8 UAV 对接回收控制系统运行逻辑
Fig.8 Operation logic of UAV docking recovery control system

3 气动力数据仿真建模

3.1 UAV 预设对接路径分析

由于空中平台体积要远大于待回收 UAV, UAV 降落过程中对平台影响较小,但空中平台后方流场受到其翼尖涡的作用,流动特性复杂,扰流变化不规律。UAV 在接近平台进行对接的过程中会经过平台后方的扰流区,受到强烈的气动干扰。因此,摸清起降平台翼尖涡对于 UAV 的气动影响是 UAV 能否正常对接降落的关键。针对空中平台翼尖涡进行分析,空中平台巡航飞行过程中产生的速度涡量图如图 9 所示。

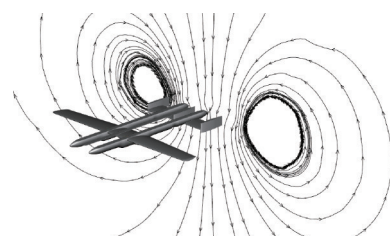


图 9 空中平台后方尾流场涡量与流线图
Fig.9 Vorticity and flow diagram of wake field behind air platform

经计算 UAV 在远离平台 15 m 后所受干扰可忽略不计,因此本文设定 UAV 起始位置与空中平台保持 15 m 的相对距离。“进近距离”即为 UAV 从起始位置向空中平台对接过程中的位移距离,分别模拟计算 UAV 以不同角度接近空中平台的气动状态。从后方向平台加速进近角度拟为:15°,30°,45°,60°,75°;从前方向平台接近角度为 105°,120°,135°,150°,165°。90°时为垂直向下降低高度接近空中平台。UAV 沿不同角度的进近路线示意图如图 10 所示。

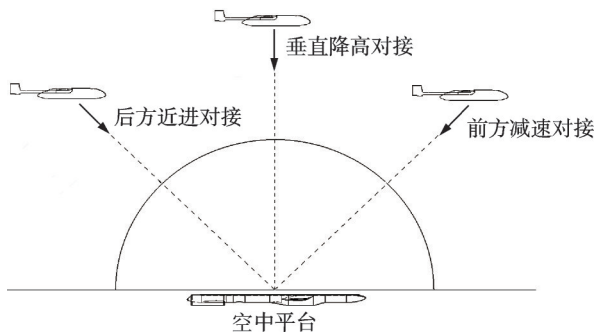


图 10 UAV 对接降落时不同相对位置示意图

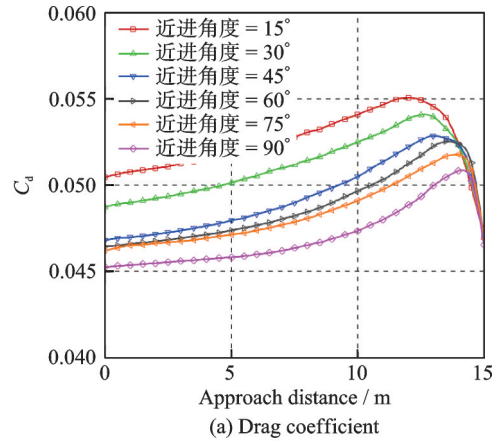
Fig.10 Different relative positions of UAV docking and landing

3.2 后方加速滑行对接仿真计算

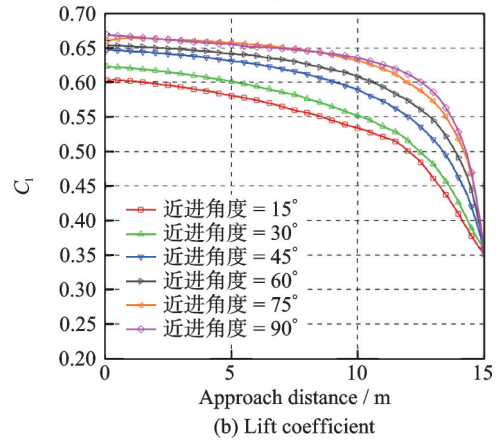
设定 UAV 从后方滑行进近对接,设定从后方向平台进近角度为:15°,30°,45°,60°,75°。横坐标为 UAV 从初始位置沿当前路径下向空中平台的进近距离。初始 UAV 与空中平台相距 15 m。当 UAV 进近距离达到 15 m,即为 UAV 与平台对接。纵坐标分别为 UAV 的阻力、升力和俯仰力矩系数。UAV 在接近空中平台的过程中产生的纵向气动参数变化如图 11 所示。

图 11(a)为 UAV 阻力系数变化。当 UAV 逐渐接近空中平台,受到的干扰增加,阻力系数逐渐增加。相同距离下,UAV 相对平台的接近角度越小,UAV 整体的阻力系数越大。当 UAV 与平台的相对距离低于 2 m 时,UAV 的阻力系数会随相对距离的减小出现向下转折,阻力系数大幅减小。沿大角度接近平台时转折较为剧烈,沿小角度接近平台则转折相对更为平缓。这是由于 UAV 从不同方向进入平台机翼扰流区的相对位置不同导致。

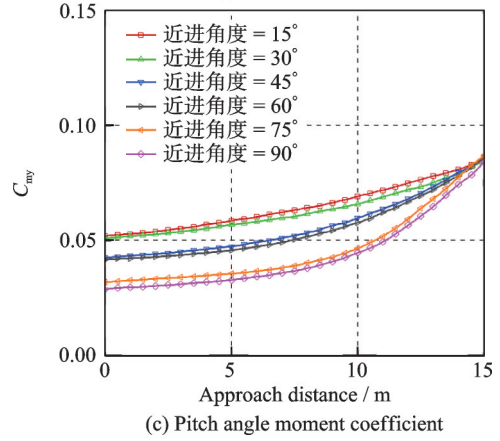
图 11(b)为 UAV 升力系数变化。在 UAV 向平台进近距离小于 10 m 时,随着 UAV 与平台相对距离缩短,UAV 的升力系数缓慢减小。在 UAV 沿相距初始位置向平台进近超过 12 m 后,UAV 两侧机翼开始受到平台产生的翼尖涡干扰,升力系数迅速降低,直至 UAV 与平台完全对接,UAV 停靠至空中平台。



(a) Drag coefficient



(b) Lift coefficient



(c) Pitch angle moment coefficient

图 11 后方加速对接过程 UAV 不同相对位置气动参数变化

Fig.11 Changes of aerodynamic parameters of UAV at different relative positions during rear acceleration docking

图 11(c)为 UAV 向平台进近过程中俯仰力矩变化。UAV 的进近角度越小,所受干扰力矩影响越大,俯仰力矩在 UAV 进入平台扰流区时向上转折越平缓;UAV 进近角度越大,虽然进近过程中俯仰力矩相对较小,但在扰流区附近向上转折突变也越剧烈,最终不同角度方向进近的 UAV 在停靠至平台时气动参数基本一致。

3.3 前方减速对接仿真计算

设定 UAV 初始位置位于空中平台前上方,

UAV 逐渐减少并降低高度,直至空中平台“接住” UAV。从后方向平台近进角度为:105°,120°,135°,150°。图 12 中横坐标为 UAV 沿当前路径向空中平台进近的距离,纵坐标分别为 UAV 的阻力、升力和俯仰力矩系数。UAV 在接近空中平台的过程中产生的纵向气动参数变化如图 12 所示。

图 12(a)为 UAV 从空中平台前方逐渐减速直至与平台对接过程中的阻力系数变化。随着 UAV 逐渐减速接近平台,不同路径下的阻力系数相较于从后方进近过程变化量较小。在进入扰流区之前,

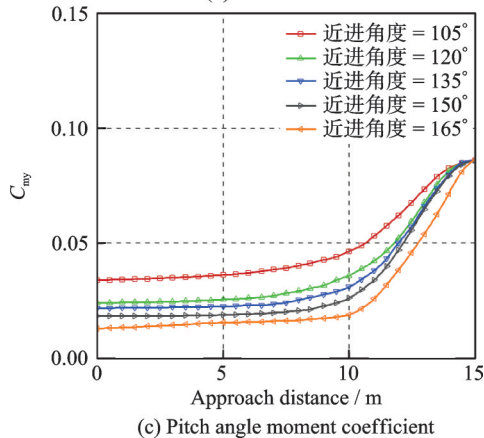
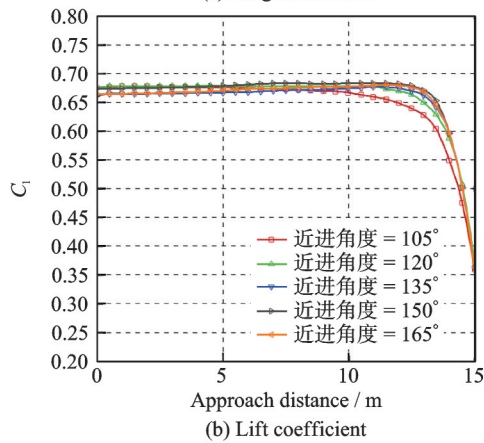
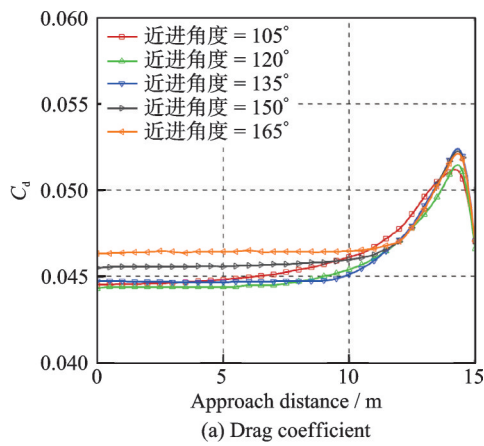


图 12 前方减速对接过程 UAV 不同相对位置气动参数变化

Fig.12 Changes of aerodynamic parameters of UAV at different relative positions during forward deceleration docking

UAV 阻力系数也没有显著的变化趋势。在 UAV 从前方接近平台至 4 m 以内,UAV 纵向相对位置逐渐处于平台机翼后方,开始受到翼尖涡影响,阻力系数向上突变转折,转折程度相较从前方进近明显更加剧烈,阻力系数上升至一定程度后迅速回落,最后达到停靠状态。

图 12(b)为 UAV 从前方减速对接时的升力系数变化。UAV 距离平台较远时,不同相对角度路径下的升力系数同样没有明显的分层,随着 UAV 进近距离的增加没有明显变化。但在 UAV 进入平台周围 4 m 范围内,升力系数快速下降。这是由于 UAV 进入平台翼尖涡扰流区受到下洗气流干扰导致。

图 12(c)为 UAV 从前方减速对接时的俯仰力矩系数变化。随着角度增加,UAV 俯仰力矩系数逐渐减小,但整体数值相较从后方接近要小,说明 UAV 在前方时受到的纵向干扰要小于无人在平台后方时的情况。增量变化方面,与升阻力系数相同,UAV 进近平台至一定距离后进入扰流区,UAV 俯仰力矩迅速增加,且转折程度也更加明显。

整体而言,UAV 从平台前方向后方进近过程中阻力系数更小,升力系数更大,UAV 气动特性相较于从后方对接更好

3.4 UAV 气动干扰代理模型拟合建模

通过上文对 UAV 从不同方向接近平台过程中的仿真计算,获得了不同对接路径下 UAV 的气动干扰信息。但 UAV 动态模拟对接气动力方程需要根据相对位置实时获得 UAV 的气动干扰,这需要获取空中平台周围所有不同相对位置的气动干扰信息。本文使用已有的 CFD 计算数据作为训练样本,使用代理模型对没有计算到的相对位置进行拟合,以此得到 UAV 不同状态下的实时干扰信息。

本文使用 BP 神经网络作为代理模型,输入为极坐标系下的 UAV 相对位置:UAV 与平台相对夹角,UAV 与平台相对距离;输出为 UAV 的升阻力系数及俯仰力矩系数,训练回归结果如图 13 所示。图 13 中黑色空心点代表实际计算数据值,蓝色斜线代表期望拟合曲线,当数据点落在蓝色斜线上时拟合值与计算值重合。可见大多数检测数据点均在期望曲线附近,其中阻力系数与升力系数的拟合结果误差较小,俯仰力矩系数虽存在个别数据点偏离拟合曲线,但整体误差也在可接受范围内。对模型进行抽样误差检测,检测样本各项误差大小如表 3 所示。

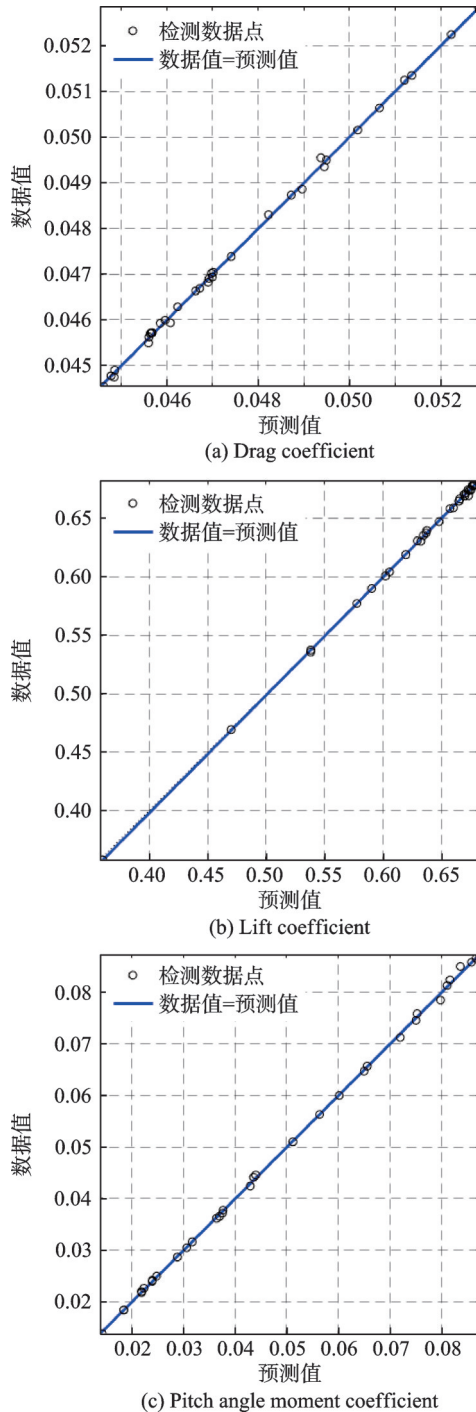


图13 代理模型回归曲线结果

Fig.13 Regression curve results of the proxy model

表3 代理模型拟合误差检测结果

Table 3 Fitting error detection results of the proxy model

参数	拟合相关度	测试误差范数	最大误差
C_d	0.999 6	0.000 44	0.000 25(1.4%)
C_l	0.999 8	0.008 41	0.003 63(1.1%)
C_{m_y}	0.999 8	0.002 80	0.001 40(3.2%)

由表3可知,UAV的升阻力系数误差较小,检测样本最大误差在2%以下,俯仰力矩系数最大误差达到了3.2%。这可能是由于俯仰力矩特性的对应变化规律较为复杂导致,但仍在可接受范围内。

使用代理模型来拟合UAV的气动干扰信息是可行的。

使用训练好的代理模型对空中平台周围空间位置的UAV气动参数分布进行拟合计算,UAV升阻力系数与俯仰力矩系数在空中平台周围的空间分布云图如图14所示。

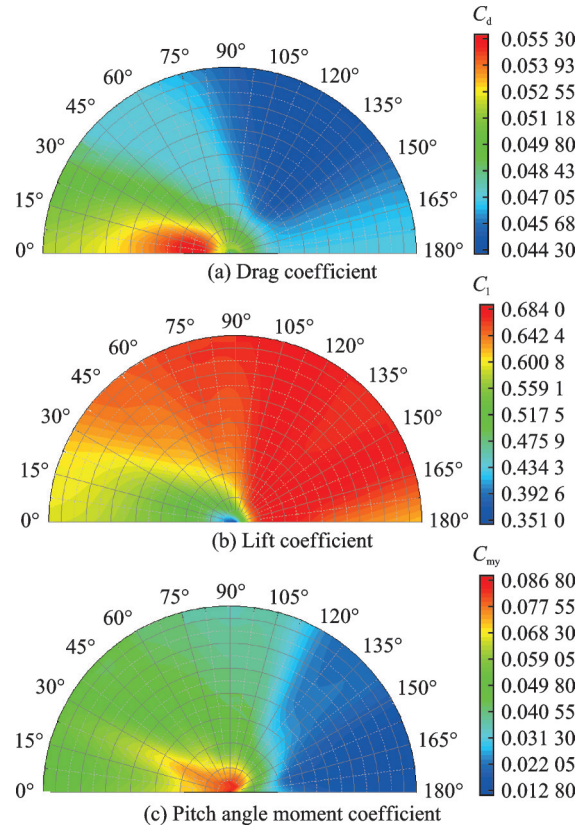


图14 UAV气动参数沿空中平台周围空间分布云图

Fig.14 Spatial distribution of UAV aerodynamic parameters around the air platform

图14表明,代理模型的拟合结果与计算结果相符。在平台周围5 m以内存在一定范围的扰流区,UAV进入该范围后各项气动参数会发生剧烈变化,在降落对接过程中应特别注意。在该范围外,平台对UAV产生的气动影响相对较小,但UAV在平台前后方所受到的气动影响仍不相同;当UAV的初始位置在平台后方时,其所受干扰较大;当UAV位于平台前方时,除了平台的翼尖涡干扰范围以外,大部分区域所受干扰较小,UAV在平台前方大部分区域飞行时几乎与UAV单独巡航飞行状态相同。

4 UAV不同对接路径控制稳定性分析

当UAV进近平台的速度较慢时,不同相对位置下UAV受到的气动干扰变化较为缓慢,规律性较强。本文假设UAV以较慢的速度进行对接,此

时可使用基于代理模型拟合的不同相对位置的 UAV 气动力干扰数据,并对比分析不同路径下 UAV 的气动性能。使用相同的控制器操作 UAV 沿不同方向向空中平台近进,研究相同控制规律下 UAV 的跟踪稳定性,对接过程中产生的误差越小,说明 UAV 相应路径下对接过程中跟踪性越好,对接回收稳定性越高。UAV 位置误差为

$$d = \sqrt{(x - x_d)^2 + (z - z_d)^2}$$

式中: x_d 和 z_d 分别为目标着点的 x 轴与 z 轴相对位

置; d 为 UAV 当前的位置误差。随着 UAV 沿指定曲线逐渐向平台进近, d 应当逐渐减为 0,此时 UAV 视为停靠在空平台上。

为了能够突出显示平台周围气动干扰对不同路径下的 UAV 造成的跟踪误差,设定 UAV 在进近过程中控制器保持 UAV 各方向速度不变。UAV 在不同相对角度下与平台直线对接的轨迹与误差变化如图 15 所示。设定 UAV 第 5 s 开始进入干扰区并受到干扰,UAV 相对速度为 1 m/s,进近过程持续 15 s,总仿真时间 20 s。

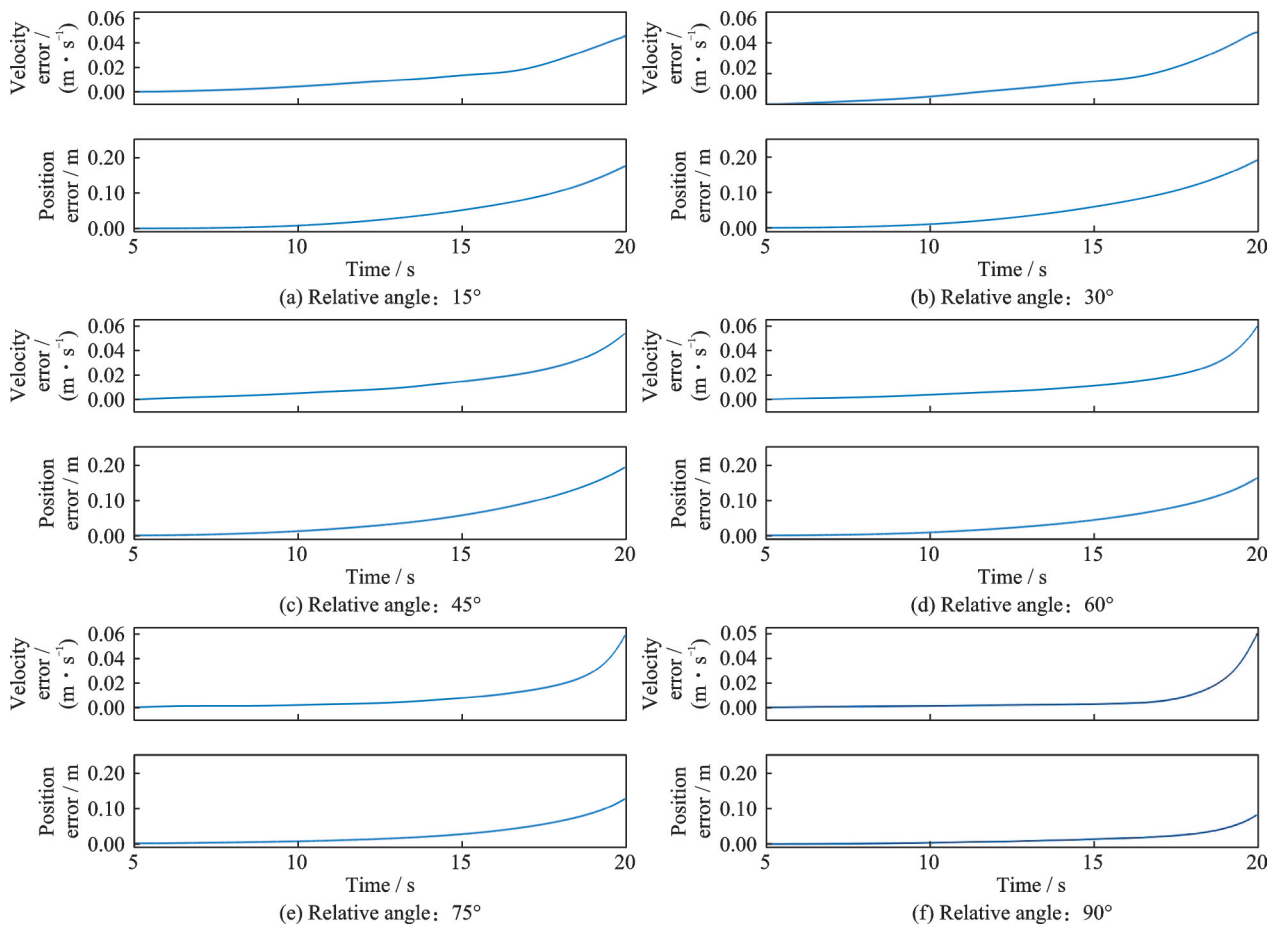


图 15 UAV 后方向直线对接路径跟踪误差

Fig.15 Tracking errors of UAV along the rear directional straight line docking path

图 16 为 UAV 以不同相对角度定速直线向平台对接的速度与位置跟踪误差。图 16 表明 UAV 从空中平台后方近进时误差跟踪曲线变化较为缓慢,但整体误差量较大。从平台前方近进时误差量较小,但误差跟踪曲线会在第 15 s 后开始出现突变转折。UAV 相对平台对接角度越大,误差曲线转折发生位置越靠后且转折越剧烈。UAV 以不同相对角度沿直线对接平台的跟踪误差信息如表 4 所示。

表 4 中位置积累误差为 UAV 在进近过程中的速度误差对时间进行积分得到。可见,当 UAV 从后方对接时,在 UAV 以 15° 相对角接近平台时最大

速度误差最小,但整体位置误差积累达到 0.17 m;而当 UAV 以 75° 接近平台时,对接位置误差最小。同时可以看出,UAV 从平台前方向直线对接时,位置误差积累量要明显小于 UAV 从后方对接,但最大速度误差要大于 UAV 从后方接近平台的过程,位置误差积累最小路径为 UAV 以 150° 方向向平台接近路径。

综上,UAV 在与空中平台定向直线对接的过程中,从前方减速靠近平台时 UAV 控制稳定性要好于 UAV 从后方接近平台的过程。稳定性最好的对接路径为 UAV 以 150° 方向从空中平台前方向后减速对接。

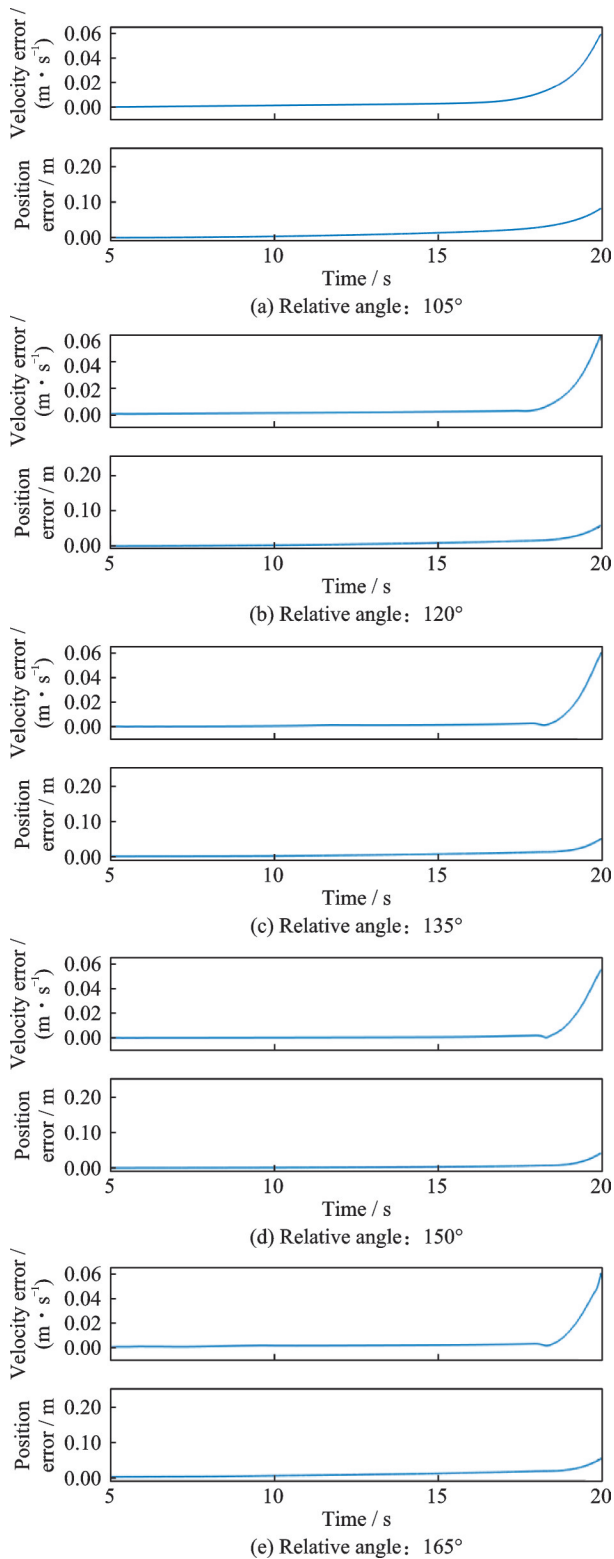


图16 UAV前方定向直线对接路径跟踪误差

Fig.16 Tracking errors of UAV along the forward orientation straight line docking path

5 结 论

与当前研究较多的“空中加油”式对接回收方法不同,使用大型空中平台、中小型UAV直接降落对接是一种新型UAV回收方法。本文主要针对UAV与大型空中平台对接回收过程中产生的

表4 定向对接回收过程UAV速度与位置误差

Table 4 UAV speed and position errors during directional docking recovery

相对角度/ (°)	最大速度 误差/(m·s ⁻¹)	平均速度 误差/(m·s ⁻¹)	位置积累 误差/m
15	0.043 54	0.011 56	0.171 50
30	0.050 60	0.013 01	0.193 90
45	0.055 76	0.013 15	0.196 20
60	0.056 84	0.010 64	0.158 90
75	0.056 86	0.008 28	0.123 70
90	0.058 30	0.008 61	0.128 60
105	0.057 15	0.005 31	0.070 94
120	0.056 81	0.003 69	0.055 14
135	0.055 90	0.003 07	0.045 75
150	0.053 37	0.002 64	0.039 29
165	0.046 27	0.002 88	0.042 64

气动干扰进行研究,研究结果如下:

(1)本文使用CFD仿真对不同路径下UAV与空中平台对接过程中的气动干扰变化进行研究,结果表明:UAV从后方接近空中平台过程中的俯仰气动特性受干扰程度较大;UAV从前方接近空中平台时,所受整体干扰量较小。

(2)通过求解气动力方程,研究对比了不同直线路径下UAV的跟踪控制稳定性,仿真结果表明:在相同控制器作用下,UAV以直线靠近空中平台、相对角度为150°时对接轨迹跟踪误差最小。

尽管本文针对双UAV对接的气动干扰进行研究,但研究对象为低速轻小型UAV,对大型飞行器对接过程中可能产生的问题仍有待分析解决。未来将以此为方向,对不同飞行器空中对接的问题进一步研究。

参考文献:

[1] 王祥科,刘志宏,丛一睿,等.小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J].航空学报,2020,41(4):023732.
WANG Xiangke, LIU Zhihong, CONG Yirui, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: Review and outlook[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 023732.

[2] 闫明松.舰载无人机作战使用及关键技术综述[J].航空电子技术,2020,51(2):16-20.
YAN Mingsong. Overview of combat operation and key technologies of shipborne unmanned aerial vehicles [J]. Avionics Technology, 2020, 51(2): 16-20.

[3] MAGILL S, SCHETZ J, MASON W. compound aircraft transport: A comparison of wingtip-docked and close-formation flight: AIAA-2003-0607[R]. [S.l.]: AIAA, 2002.

- [4] 黄雷. 美军小精灵无人机群项目发展现状综述[J]. 飞航导弹, 2018(7): 44-47.
HUANG Lei. Summary of the development status of the US army elf UAV group project[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(7): 44-47.
- [5] BANGASH Z A, SANCHEZ R P, AHMED A, et al. Aerodynamics of formation flight[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(4): 907-912.
- [6] CARUSO B, FATAKDAWALA M, PATIL A, et al. Demonstration of in-flight docking between quadcopters and fixed-wing UAV[C]//Proceedings of 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Big Sky, USA: IEEE, 2021: 1-9.
- [7] SUVARNA S, SHUKLA D, PANT R. Project HERCARE: High endurance relocatable crewless aircraft on reconnaissance aerostat[C]//Proceedings of AIAA AVIATION 2022 Forum. Chicago, USA: AIAA, 2022: 4061.
- [8] WANG L X, LI H, LIU Y X, et al. Design and realization of a cable-drogue aerial recharging device for small electric fixed-wing UAVs[C]//Proceedings of 2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Warsaw, Poland: IEEE, 2023: 926-932.
- [9] NICHOLS J W, SUN L, BEARD R W, et al. Aerial rendezvous of small unmanned aircraft using a passive towed cable system[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(4): 1131-1142.
- [10] LIN P, HE Y K, CHEN Y Z. Unmanned autonomous air-to-air refueling intelligent docking technology [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(5): 1-5.
- [11] 陈学义, 何庆, 姜勇, 等. 无人机回收技术及其发展[J]. 飞航导弹, 2011(4): 79-82.
CHEN Xueyi, HE Qing, JIANG Yong, et al. UAV recovery technology and its development[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2011(4): 79-82.
- [12] 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, 2018.
ZHANG Bolian. Research on autonomous aerial refueling docking control technology of UAV[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [13] 李俊国. 蜂群式固定翼无人机空基回收系统设计及动力学分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LI Junguo. Design and dynamic analysis of space-based recovery system for bee colony fixed-wing UAV [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [14] 苏子康, 徐忠楠, 李春涛, 等. 伸缩套臂式无人机空基回收建模与对接控制[J]. 航空学报, 2023, 44(1): 227-244.
SU Zikang, XU Zhongnan, LI Chuntao, et al. Modeling and docking control of UAV aerial recovery in form of telescopic boom[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(1): 227-244.
- [15] 王宏伦, 王延祥, 刘一恒. 基于轨迹映射的无人机拖曳式空中回收轨迹优化[J]. 航空学报, 2023, 44(20): 628775.
WANG Honglun, WANG Yanxiang, LIU Yiheng. Recovery trajectory optimization for UAV towed aerial recovery based on trajectory mapping[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(20): 628775.
- [16] 王辉, 贾自凯, 金忍, 等. 无人机视觉引导对接过程中的协同目标检测[J]. 航空学报, 2022, 43(1): 448-502.
WANG Hui, JIA Zikai, JIN Ren, et al. Cooperative object detection in UAV-based vision-guided docking [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 448-502.

(编辑:张蓓)