

## 翼伞系统自主归航的关键技术研究综述

孙青林\*, 杨金山, 孙昊, 陈增强  
(南开大学人工智能学院, 天津 300350)

**摘要:**探究翼伞系统的建模、航迹规划和轨迹跟踪控制三项关键技术,以支撑翼伞系统的自主归航在大规模装备空投补给、运载火箭助推器回收和自然灾害救援等场合的广阔应用前景。通过调研国内外翼伞系统的发展,对其三项关键技术的基本原理、常用方法和前沿技术进行对比分析和归纳概括,重点包括翼伞系统在复杂环境下的柔性建模技术和障碍空间内的航迹规划技术以及基于智能控制策略的轨迹跟踪技术。对翼伞系统自主归航关键技术的未来发展趋势进行总结和展望,有助于对翼伞系统的自主归航研究形成总体性认知并掌握其发展动向,将对后续翼伞系统自主归航的研究具有启示作用和借鉴价值。

**关键词:**翼伞系统;自主归航;航迹规划;轨迹跟踪控制

中图分类号:V249 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2024)04-001-15



## Review of key technologies for autonomous homing of parafoil systems

SUN Qinglin\*, YANG Jinshan, SUN Hao, CHEN Zengqiang  
(College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** In order to explore the key technologies of parafoil systems, including modeling, trajectory planning, and trajectory tracking control, to support their autonomous homing in wide application prospects in large-scale equipment airdrop replenishment, carrier rocket booster recovery, and natural disaster rescue applications. Through research on the development of parafoil systems both domestically and internationally, a comparative analysis and summary of the basic principles, commonly used methods, and cutting-edge technologies of the three key technologies were conducted, with a focus on the flexible modeling technology of parafoil systems in complex environments, trajectory planning technology in obstacle spaces, and trajectory tracking technology based on intelligent control strategies. A summary and outlook were made on the future development trends of key technologies for autonomous homing of parafoil systems, which can help researchers gain a comprehensive understanding of the research progress and development trends in autonomous homing of parafoil systems, and provide inspiration and reference value for further research in this area.

**Keywords:** parafoil systems; autonomous homing; trajectory planning; trajectory tracking control

降落伞利用自身高升阻比特性达到主动减速效果。因使用简单,作为主要减速装置应用在军用物资投送和各种航天航空飞行器的回收中<sup>[1]</sup>。传统降落伞技术发展成熟,但抗风扰动能力较弱,且不具备操控性<sup>[2]</sup>。为提升着陆精度,不得已将运输机靠近目标点,但暴露在敌方前的危险大幅提升。随着翼伞结构的出现及不断改进,一种新型可控航行方向和速度的自主归航翼伞系统正逐渐取代传统降落伞。

翼伞同样具备圆形降落伞易折叠收纳、体积小、质量小、易安装、升阻比高等特点<sup>[3]</sup>。除此之

外,翼伞投放后不仅可以进行稳定的滑翔和偏转,还可以在适当的高度采取下拉双侧操纵绳的动作完成迎风雀降。在将推力系统与翼伞控制系统相结合以构建动力翼伞系统之后,还能够实现对翼伞飞行速度和高度的控制。翼伞凭借出色的滑翔性能、操控性能和平稳的着陆性能,能够快速、准确地将人员、装备、飞行器和物资等从较远的距离投放至目标区域。

翼伞具备的优异性能为实现自主归航提供了坚实的基础。本文首先分析和概括了国内外翼伞的发展阶段,并阐明其基本机理和性能。在此基

收稿日期:2023-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61973172,62003177,61973175);天津市研究生科研创新基金资助项目(2022BKYZ048)

\*第一作者:孙青林(1963—),男,天津人,教授,博士,博士生导师,E-mail:sunql@nankai.edu.cn

引用格式:孙青林,杨金山,孙昊,等.翼伞系统自主归航的关键技术研究综述[J].国防科技大学学报,2024,46(4):1-15.

Citation:SUN Q L, YANG J S, SUN H, et al. Review of key technologies for autonomous homing of parafoil systems[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(4): 1-15.

基础上,重点总结了复杂环境下翼伞系统的动力学建模、航迹规划和轨迹跟踪控制方法,并参考了无人机相关前沿技术。最后探讨了翼伞系统建模与规划控制方法的未来研究方向。

## 1 国内外翼伞系统的发展

翼伞是由柔性纺织材料制成的一种双层气动减速结构装置,由伞衣、操纵绳、吊绳、控制器及负载等共同组成翼伞系统,如图 1(a)所示。伞衣部分由上下两个翼面组成,前缘部分由多个带缺口的气室组成,后缘全部封闭。利用前缘的气室可以压缩空气并固定翼型,同时产生升力和阻力<sup>[4-5]</sup>。控制器和负载通过吊绳与伞衣连接,翼伞后缘两侧的操纵绳连接在控制器内高精度舵机或伺服电机轴的臂杆上。通过电机下拉单侧后缘,增大单侧阻力并产生偏航力矩,以调节翼伞系统的飞行航向和速度。

### 1.1 早期翼伞系统形成阶段

翼伞是精确回收系统的核心部件,其发展始于 20 世纪,国外多个研究机构开展了对各种翼伞结构外形的气动性能和滑翔性能方面的理论和实验研究<sup>[6]</sup>。经过第一次世界大战后,德国被禁止发展动力飞行器,这迫使德国的飞行器制造者开始从滑翔翼伞入手。1930 年,德国的 Ludwig Höllein 尝试将降落伞的伞衣面改为三角形,改进后的降落伞飞行速度提高至 1.3 m/s。二战结束后,美国大力投资和推动航空航天事业。1948 年,美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)制造的 Paresev 龙骨式翼伞,用于地球轨道航天器的着陆回收研究,如图 1(b)所示,但由于伞衣易损毁的问题,逐渐被弃用。直到 1964 年,美国的 Domina Jalbert 发明了一种名为“Parafoil”的冲压式翼伞,兼顾了气球和风筝的优点,升阻比能达到 2 以上,并且更加安全可靠。如今,冲压式翼伞已经有多种成熟的构型,如图 1(c)、(d)、(e)所示。



(b) 龙骨式翼伞

(b) Keel parafoil



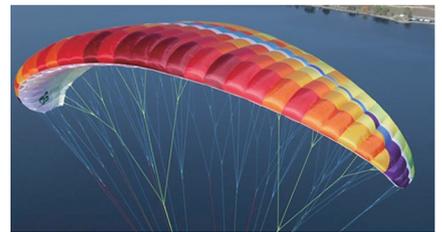
(c) 矩形翼伞

(c) Rectangular parafoil



(d) 梯形翼伞

(d) Trapezoidal parafoil



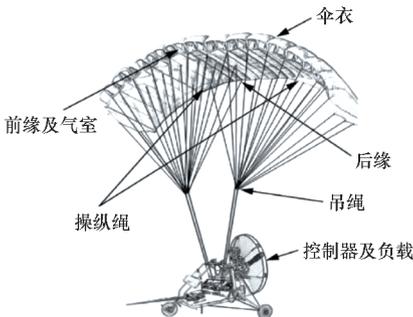
(e) 椭圆形翼伞

(e) Elliptic parafoil

图 1 翼伞结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parafoil structure

翼伞的性能主要包括气动参数、滑翔比、开伞动载等,其中翼型剖面、安装角、展弦比和平面形状都对性能产生直接影响<sup>[7]</sup>。由于翼伞的飞行速度较低,通常采用低速翼型,如 Clark Y 或经过美国国家航空咨询委员会(national advisory committee for aeronautics, NACA)改型的翼型。Para-Flite 公司的 X-Fly 系列翼伞采用了椭圆形翼型,提高了滑翔比<sup>[8-9]</sup>。选择合适的翼型剖面、安装角和展弦比等可以最大限度地提高翼伞的飞行性能和稳定性。同时,不同的翼型也适用于不同



(a) 翼伞系统结构

(a) Structure of parafoil system

的应用场景,如低速翼型适用于起降距离较短的场景,而高速翼型则适用于需要快速飞行的场景。翼型的选择和优化是翼伞技术不断进步和发展的重要因素。

### 1.2 中期翼伞系统试验阶段

在20世纪后期,国内外已经开始大规模研究翼伞控制系统,控制系统设计的目的是实现翼伞系统自主归航,主要是采用全球定位系统(global positioning system, GPS)导航控制展开研究<sup>[10]</sup>。1994年,Natick研究机构应美国军需发展要求研发了一系列翼伞精确空投导航系统,其控制系统由军用GPS接收机、微型计算机、各类传感器以及执行机构等组成。北京空间机电研究所一直与国内多所高校和企业保持合作,致力于推动航天器回收全过程自感知和高精度自主归航技术的发展<sup>[11-12]</sup>。北京空间机电研究所研发了一套翼伞精确定点归航系统,该系统包括双天线GPS定位器、嵌入式归航控制器、伺服驱动电机及无线传输模块等,如图2所示。这套控制系统可应用于伞衣面积为80 m<sup>2</sup>、有效载荷为5~10 kN、着陆误差为300 m以内的翼伞上,展现了极大的应用价值<sup>[13]</sup>。

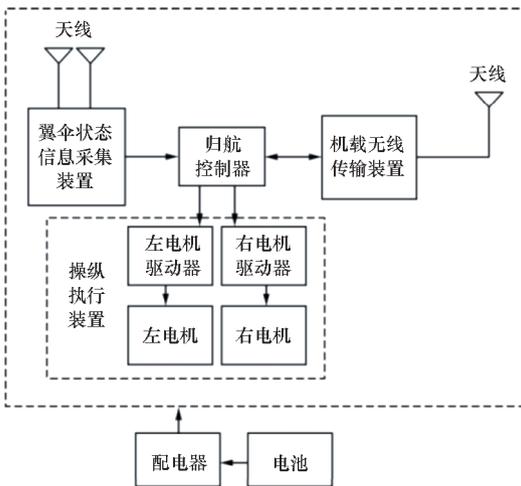


图2 控制系统设备组成框图<sup>[10]</sup>

Fig.2 Block diagram of control system equipment composition<sup>[10]</sup>

### 1.3 后期翼伞系统应用阶段

21世纪以来,微电子技术、导航和制导技术的迅猛发展,翼伞控制系统能够应用更加复杂的控制算法,实现更为精确的航迹规划和轨迹跟踪控制<sup>[14]</sup>。由美国和欧洲的多家公司研发的翼伞自主归航控制已经得到了工程实际应用。如美国Airborne Systems公司开发的多种型号的完全自主归航的货物运送翼伞系统,FireFly、DragonFly、

MicroFly II等。图3(a)为FireFly翼伞系统,最大载荷能力为1 000 kg,最大投放高度为7.4 km,最远投放距离为25 km,最大着陆误差为150 m。另外,由德国、荷兰、西班牙等欧洲国家共同开展的FASTWing项目,旨在研发一种在高负载情况下具备高滑翔比的翼伞系统,如图3(b)所示,它能够承受3 200 kg的有效载荷,滑翔比可以达到2.5~6。

尽管我国在翼伞自主归航控制技术的研究相对较晚,但在航空航天和民用领域中也有一定应用。如北京空间机电研究所研发的助推器翼伞回收系统已成功实现对运载火箭助推器的可控回收和定点着陆,如图3(c)所示,该翼伞系统的伞衣面积为300 m<sup>2</sup>,有效载荷达到了4 000 kg<sup>[15]</sup>。中航工业航宇公司研发的SYW-1柔性翼伞无人机,如图3(d)所示,主要应用于机场、港口和高速公路等进行除雾工作,它的有效载荷为80 kg,有效滞空工作时间为3 h,仅需50 m的拖曳起飞距离,在动力出现故障时,仍可依靠翼伞滑翔降落。此外,该翼伞系统成本仅为对应无人机或直升机的1/5~1/3,也可用于农业灌溉、抢险救灾和电力巡检等工作。



(a) FireFly 翼伞  
(a) FireFly parafoil

(b) FASTWing 翼伞  
(b) FASTWing parafoil



(c) 助推器翼伞回收<sup>[15]</sup>  
(c) Parafoil recovery booster<sup>[15]</sup>

(d) SYW-1 翼伞  
(d) SYW-1 parafoil

图3 国内外翼伞系统的应用

Fig.3 Application of parafoil system at home and abroad

随着翼伞系统军用平台项目的研发以及商业应用的加速,翼伞系统的发展与应用必然在国防科技建设及民生领域占据重要地位。

由于翼伞系统的柔性结构和实际工作环境接近地面或海面,极易受到风场的干扰。风场不仅会直接改变翼伞系统的飞行轨迹,而且还会影响其飞行姿态和飞行速度,甚至导致飞行控制错乱、飞行器失稳等问题。因此,在翼伞系统的建模和航迹规划中,必须考虑风场环境影响,同时在控制策略方面对风场干扰进行针对性的补偿和消除也极为重要。翼伞系统自主归航控制研究的重点和难点是如何在复杂环境下实现高精度航迹规划和轨迹跟踪控制,并且具有较好的收敛性和鲁棒性<sup>[16]</sup>。

## 2 翼伞系统建模

翼伞系统高保真的数学模型为控制系统的设计和优化提供支持,并预测其在复杂环境中的动力学特性,用于指导实际应用<sup>[17]</sup>。常用的建模方法是在理想环境下基于物-伞多体系统的建模思想,即将翼伞、吊绳和负载等多个物体视为刚体,建立多自由动力学模型<sup>[18-19]</sup>。随着计算机仿真技术不断进步,研究人员采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)来建立翼伞系统动力学模型<sup>[20-21]</sup>。因此,翼伞系统的建模方法分为基于物-伞多体系统建模和基于 CFD 柔性建模。

### 2.1 基于物-伞多体系统建模

多体系统建模方法发展至今,由国内外研究人员提出了多种不同自由度(degree of freedom, DOF)的模型,现有的研究中常用到的模型有 3-DOF、4-DOF、6-DOF、8-DOF 和 9-DOF 模型,翼伞模型多自由度的组成如表 1 所示。

表 1 翼伞模型多自由度的组成

Tab. 1 Composition of multiple degrees of freedom of parafoil model

自由度	组成说明
3	翼伞系统的 3 个平动自由度 <sup>[22]</sup>
4	翼伞系统的 3 个平动自由度及偏航角自由度 <sup>[23]</sup>
6	翼伞系统的 3 个平动自由度和 3 个转动自由度 <sup>[24-25]</sup>
8	翼伞系统的 3 个平动自由度、3 个转动自由度以及偏航角和俯仰角自由度 <sup>[26-27]</sup>
9	翼伞系统的 3 个平动自由度、3 个转动自由度和翼伞相对于负载的 3 个转动自由度 <sup>[28-29]</sup>

根据翼伞系统的实际飞行环境及执行不同任务的需求,建立合理自由度的动力学模型是绝对必要的。如意大利 DIS 实验室建立了基于牛顿-欧拉法的 9-DOF 模型,并与 6-DOF 模型对比,发现 9-DOF 模型能够更好地反映翼伞和负载之间的相对运动特性,更加适合用于翼伞系统性能的测试,而 6-DOF 模型适合用于航迹规划和控制器设计<sup>[30]</sup>。

此外, Vishnyak<sup>[31]</sup>提出的较为复杂的 12-DOF 模型和杨海鹏等<sup>[32]</sup>建立的更为复杂的 15-DOF 模型。这两种模型都是把伞衣和负载视为两个刚体,前者仅考虑了吊绳的弹性形变,后者不仅考虑了吊绳的形变,还考虑了操纵绳的形变。最终通过仿真分析,两种模型都更能够清晰地展示翼伞系统转弯和雀降时的运动特性。

在最新的研究中,张青斌等<sup>[33]</sup>采用拟坐标形式的拉格朗日方程,将伞衣、负载和 2 个连接点都视为刚体,如图 4 所示。伞绳和吊带的相交点视为质点,则伞衣和负载各有 6 个自由度,2 个质点各有 3 个自由度,建立 18-DOF 的翼伞系统模型。从对比结果可知仿真与实际拟合效果较好,如图 5 所示,两者之间的差异主要是受高空风场的影响,该模型能够实现对不同材料翼伞的性能测试。

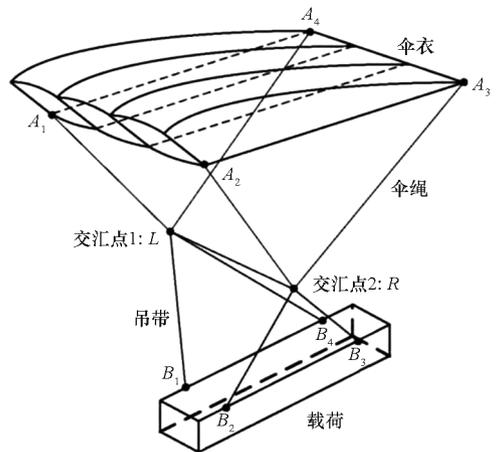


图 4 翼伞系统 4 刚体模型<sup>[33]</sup>

Fig. 4 4 rigid body model of parafoil system<sup>[33]</sup>

采用多体系统建模方法应根据实际需求进行合理选择,单纯追求高精度则模型越复杂,对应的计算量也越大<sup>[34]</sup>。若仅需得知翼伞系统整体的位置信息,则采用简单的 3-DOF 或者 4-DOF 的质点模型;若不仅需要翼伞系统的位置信息,还需要姿态信息,则 6-DOF 模型即可满足要求;若需要初步分析和研究伞体和载荷之间的相对运动,则可以选择较为复杂的 8-DOF;若需要较为完整地

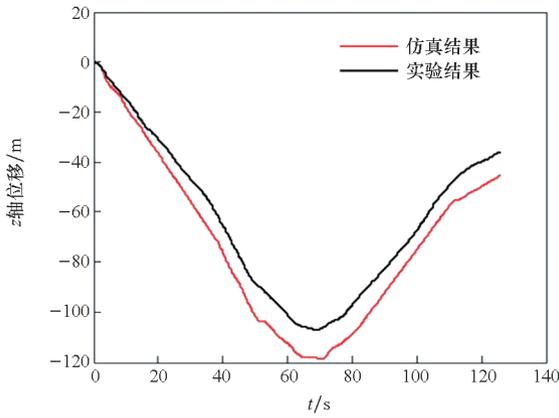


图5 沿z轴方向的仿真与实验位移曲线<sup>[33]</sup>  
Fig. 5 Simulation and test displacement curves along the z-axis direction<sup>[33]</sup>

反映翼伞系统内部之间的相对运动特性,则需要更为复杂的 15-DOF 和 18-DOF 模型。

### 2.2 基于 CFD 柔性建模

基于 CFD 柔性建模方法是随着对翼伞气动性能的研究逐渐发展而来的。翼伞系统依靠伞衣提供所需的气动力,准确辨识气动参数对于建立精确数学模型至关重要<sup>[35]</sup>。对翼伞气动性能的研究通常采用风洞实验、飞行实验和数值模拟三种方法,如表 2 所示。

表 2 翼伞气动性能研究方法

Tab. 2 Research methods of parafoil aerodynamic performance

方法	优缺点
风洞实验	可以准确地调整实验条件,实验结果精确度较高,但实验成本较高、可重复性差、结果数据分散 <sup>[36-37]</sup>
飞行实验	不受空间限制,外界环境真实,性能研究更加准确,但实验周期长、成本高 <sup>[38-39]</sup>
数值模拟	实验参数设置范围广,可选多个区域或测点进行结果分析,结果数据易处理、成本低、周期短,但外界环境模拟效果较差,实验结果精度较低 <sup>[40-41]</sup>

飞行实验是三种方法中耗资最高的,因此早期翼伞系统气动性能的研究都是采用风洞实验实现的。综合考虑以上因素,目前更多的是基于 CFD 数值模拟的方法研究翼伞系统气动特性。

基于有限元法或有限元体积法对模型空间进行离散化,根据控制方程求解获得空气流场内的

流速分布、流量分布和压力分布,将仿真结果与飞行实验结果对比,辨识气动参数。张思宇等<sup>[42]</sup>基于拉格朗日-欧拉法 (arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)进行了翼伞系统开伞过程的非线性动力学数值模拟。将结构网格融入流场网格中,如图 6 所示,利用 ANSYS 软件搭建流固耦合 (fluid-solid interaction, FSI) 的仿真平台 (规模为  $6 \times 8 \times 10$ ,单位为 WS,表示伞衣弦长)。最终与实际翼伞空投开伞过程的开伞动载峰值对比,两者误差仅为 4.09%。由此得知,采用 CFD 数值模拟的方法对翼伞气动力的计算可获得更为准确的气动参数,进而保障了翼伞系统动力学模型的精度。

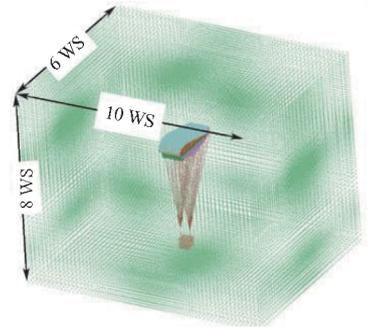
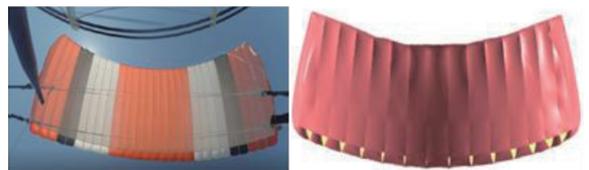


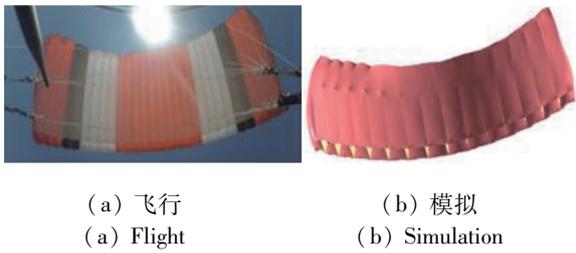
图 6 流固耦合数值计算模型<sup>[42]</sup>  
Fig. 6 Numerical calculation model of fluid-structure interaction<sup>[42]</sup>

Zhu 等<sup>[43]</sup>基于 FSI 仿真技术计算气动参数,利用最小二乘法拟合风场环境下的气动模型,建立了侧风条件下翼伞系统的八自由度动力学模型。仿真与实验对比结果如图 7~9 所示,图 7 和图 8 表明该模型的实时动态响应与空投实验数据一致性较好,图 9 通过对比风场条件下的仿真轨迹、实际飞行实验轨迹和无风场条件下的仿真轨迹,最终结合数据发现风场条件下的仿真与实际飞行实验误差约为 5%,无风场条件下的仿真与实际飞行实验误差约为 15%,由此推断在复杂环境下基于 CFD 柔性建模能够更好地贴近实际翼伞飞行实验。



(a) 飞行 (a) Flight  
(b) 模拟 (b) Simulation

图 7 无控制滑翔状态中翼伞几何形状的对比<sup>[43]</sup>  
Fig. 7 Comparison of parafoil geometry in uncontrolled gliding states<sup>[43]</sup>



(a) 飞行 (a) Flight  
(b) 模拟 (b) Simulation

图 8 左后缘偏转状态中翼伞几何形状的对比<sup>[43]</sup>  
Fig. 8 Comparison of parafoil geometry in left rear edge deflection state<sup>[43]</sup>

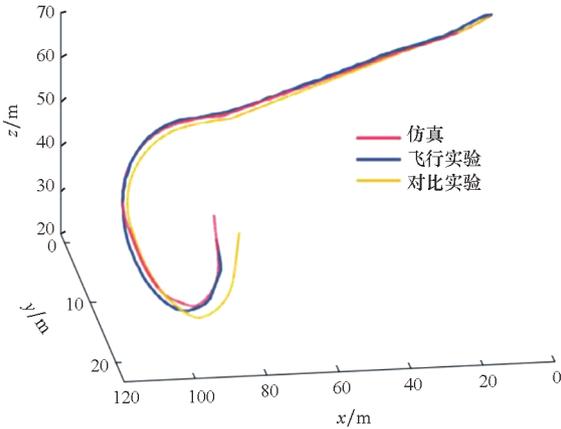


图 9 仿真与实验中翼伞转弯轨迹的对比<sup>[43]</sup>  
Fig. 9 Comparison of turning trajectory of parafoil in simulation and experiment<sup>[43]</sup>

通过对比和总结两种翼伞系统建模方法,可以得知,18-DOF 的多体系统模型能够完整地反映翼伞系统的运动状态,但计算复杂且受高空风场因素影响其模型精度会随着翼伞高度的提升而降低。未考虑高空风场多体系统模型的仿真轨迹与实际飞行轨迹存在差距,考虑高空风场的 CFD 柔性建模可以更进一步提高翼伞系统动力学模型的预测精度,同时采用流体仿真软件建立翼伞系统模型的方法也越来越受到重视。

### 3 翼伞系统航迹规划

翼伞系统自主归航需要控制系统计算实际航迹和规划航迹之间的位置误差,并通过控制算法调整方向以缩小误差,实现精确的自主归航。因此,航迹规划的合理性对实现翼伞系统的自主归航非常重要。

航迹规划需要满足不同任务的特定性能指标,如:装备补给的安全性和隐蔽性;救援任务的及时性和精准性;空中喷洒工作的系统能耗等<sup>[44]</sup>。常用的航迹规划法为:简单归航法、最优控制归航法和分段归航法。实际翼伞系统在空

中自主归航的环境较为复杂,存在错综复杂的山峰和高楼建筑等障碍物,常用的方法将难以适用。通过近些年的研究,基于智能优化算法的航迹规划方法在障碍空间内得到了应用<sup>[45]</sup>。所以将翼伞系统的航迹规划方法分为无障碍空间内的常用航迹规划法和障碍空间内的航迹规划法。

#### 3.1 无障碍空间内的常用航迹规划法

##### 3.1.1 简单归航法

简单归航法是依据翼伞系统起始点到目标点的连线与翼伞系统的速度矢量方向之间夹角大小,来判断是否施加控制量以调整翼伞系统滑翔方向。简单归航法又可以分为径向归航、锥形归航和定方位角归航等,其中径向归航有个主要特征是“盲角”<sup>[46-48]</sup>。当翼伞系统与目标点之间存在一个大于“盲角”的偏差角时,需要施加控制量以调整翼伞航向。Li 等<sup>[49]</sup>提出了一个具有“盲角”的非比例控制的径向归航法,并给出了用于判断翼伞系统是否需要转弯以及如何实现转弯的标准,这套标准可以直接应用在实际工程中。

简单归航法的原理简单且易于实现,在翼伞系统的早期工程应用中广泛采用。但在复杂环境下,需要频繁操作,控制系统能耗较大,落点位置精度不高,且无法保证能够平稳着陆,所以目前简单归航法已较少采用<sup>[50]</sup>。

##### 3.1.2 最优控制归航法

最优控制归航法根据翼伞系统的初始条件及雀降时刻的末端条件,求解出最优归航轨迹和最优控制律。最优控制归航法的求解方法可分为间接法、直接法和智能优化算法,如表 3 所示。在翼伞系统最优控制归航法中,通常采用最优控制理论和智能优化算法的综合应用。最优控制理论利用动态规划、最优化控制等方法,对翼伞系统的状态变量进行优化控制,使得系统能够按照预定轨迹实现自主归航。智能优化算法则通过对路径进行优化,得到最优的航迹。

翼伞系统的最优控制归航法具有精度高、自主性强、能耗低、适应性好等优点。但其自身的特点也带来了其不可避免的缺点,如控制曲线会随着时间连续发生变化,电机需要不停地调整控制量大小,翼伞系统也会频繁地发生襟翼偏转,无法稳定在某一状态。因此,最优控制归航法在工程中应用还存在着较大的局限性,对最优控制归航法的研究仍偏重于理论意义。

表3 最优控制归航法分类

Tab.3 Optimal control homing method classification

最优控制归航法	原理及典型算法	特点
间接法	以变分法或庞特里亚金极小值原理为基础,求解最优归航轨迹 <sup>[51]</sup>	基于梯度的搜索方法,存在初值敏感现象,初始值的估计选取对优化结果的影响较大
直接法	将控制变量参数化,并把具有特定性能指标的最优控制问题转化为带约束的非线性规划问题,高斯伪谱法 <sup>[52]</sup> 、动态规划法 <sup>[53]</sup> 、基于敏感度分析的优化算法 <sup>[54]</sup>	对初值不敏感,高效且实用,具有较强鲁棒性和广泛适用性
智能优化算法	对路径进行优化,混沌粒子群算法 <sup>[55]</sup> 、快速搜索随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT) 算法 <sup>[56]</sup> 、贝叶斯曲线轨迹规划法 <sup>[57]</sup>	

3.1.3 分段归航法

分段归航法是一种在翼伞系统距离目标区域较远时采用的自主归航方式,其原理是根据翼伞系统在归航过程不同阶段的特点将整个归航轨迹分成多段,并基于优化算法求解各段轨迹的规划参数。因此,分段归航法具有较高的适应性和灵活性。

典型的分段归航过程如图 10 所示,一般分为向心归航、能量控制及迎风雀降三段,各段之间以圆柱螺旋轨迹过渡。

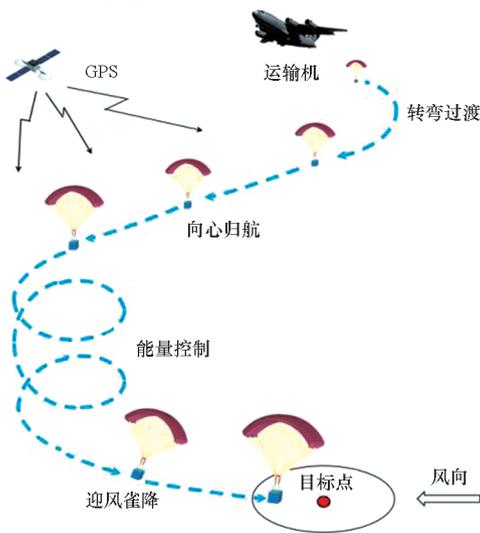


图 10 翼伞系统分段归航典型过程

Fig. 10 Typical process of segmental homing of parafoil system

分段归航法简化了翼伞系统自主归航的过程,在工程应用中得到重视和广泛运用。如美国 NASA 的 X-38 项目应用了分段归航法的改进算法,并且已得到实验验证<sup>[58]</sup>。分段归航法中对各段轨迹也采用过许多典型的智能优化算法,如遗传算法<sup>[59]</sup>、量子差分进化算法<sup>[60]</sup>、人工鱼群算法<sup>[61]</sup>。

高峰等<sup>[62]</sup>建立了 5 段归航轨迹的优化模型,如图 11 所示,以控制能耗最小构建目标函数,将归航控制时间和偏转半径作为输入量,并基于高斯伪谱法对最优化轨迹进行求解<sup>[62]</sup>。最后通过能耗对比,发现 5 段归航法的能耗约为直接归航法的 50 倍。由此得知,归航法在工程中的应用还需考虑能耗在允许的条件内。

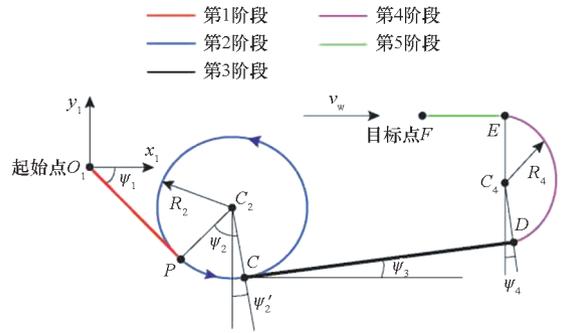


图 11 5 段归航轨迹示意图<sup>[62]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of the 5-segment homing track<sup>[62]</sup>

3.2 障碍空间内的航迹规划法

障碍空间内翼伞系统的航迹规划是在最优控制归航法和分段归航法的基础上发展而来的<sup>[63]</sup>。如李宇辉等<sup>[64]</sup>提出了一种在复杂环境下翼伞系统组合式的航迹规划方法,该方法将翼伞飞行途径的区域分为着陆区和障碍区,如图 12 所示。采用适应性改进的 RRT 算法在障碍区内搜索可行

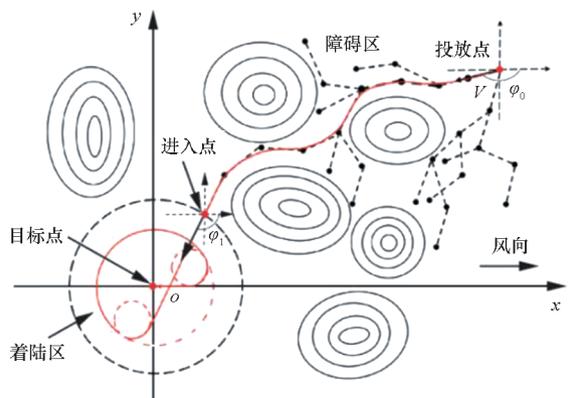
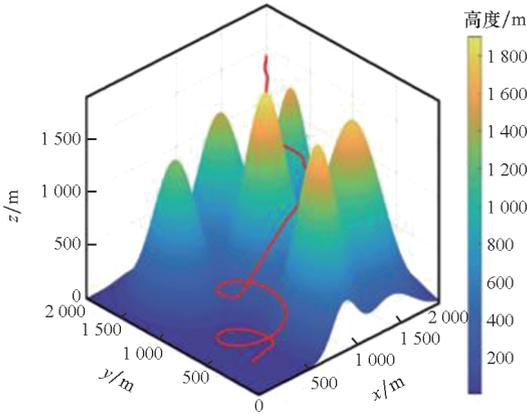


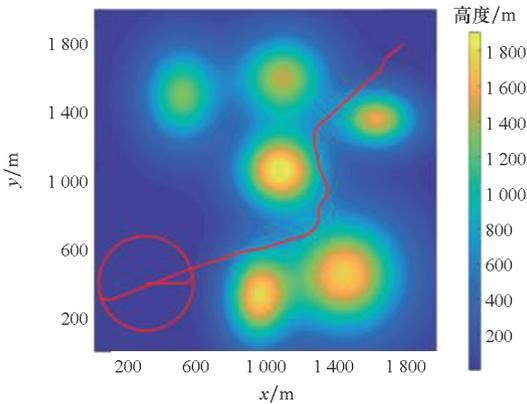
图 12 组合式航迹规划示意图<sup>[64]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of combined route planning<sup>[64]</sup>

的平滑轨迹,进入着陆区后,基于遗传算法进行分段航迹规划,以实现翼伞系统的能耗控制和迎风雀降。仿真结果如图 13 所示,最终翼伞系统能够完成在障碍空间内的自主归航,但航迹规划求解的时间较慢(16.67 s)。



(a) 3D 视角  
(a) 3D perspective



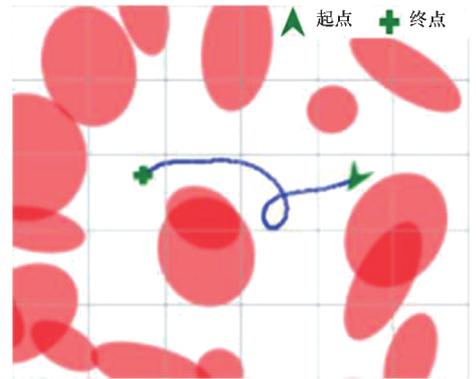
(b) 2D 视角  
(b) 2D perspective

图 13 组合式航迹规划仿真结果<sup>[64]</sup>  
Fig. 13 Simulation results of combined trajectory planning<sup>[64]</sup>

为了减少障碍空间内航迹规划的时间,张超等<sup>[65]</sup>建立了翼伞着陆过程的障碍威胁数学模型,提出了一种改进 A\* 算法的航迹规划法和虚拟威胁法,通过仿真结果得到可以有效避开障碍威胁,并且航迹规划时间小于 1 s,更好地满足了翼伞航迹规划要求。

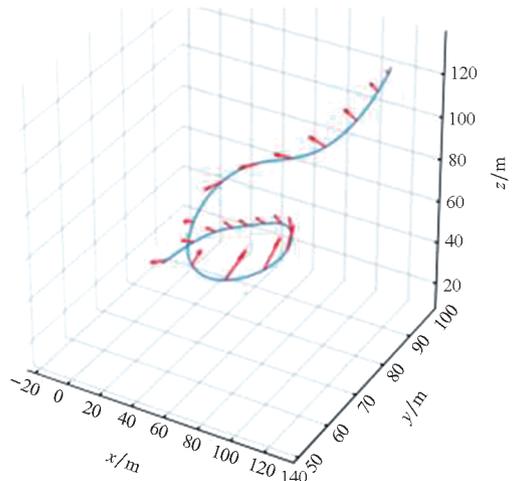
深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)通过引入深度神经网络来处理高维度的状态和动作空间,为翼伞的航迹规划提供了可行性方案。如 Park 等<sup>[66]</sup>提出了一种数据驱动的翼伞自动着陆规避危险技术,该技术基于柔性演员-评论家(soft actor-critic, SAC)算法,翼伞智能体通过观察、被奖励和采取动作与环境进行交互,学习到可

以规避危险的转向命令。图 14 所示为简单案例和困难案例下训练成功的结果,可以得知,当翼伞系统随机分布在障碍空间内,通过自主感知和学习找出了规避危险的正确转向逻辑,实现了安全归航。



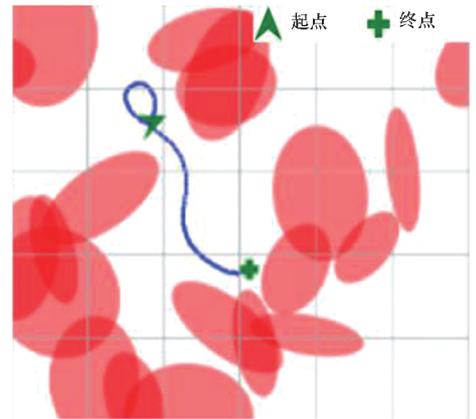
(a) 翼伞二维轨迹(简单案例)

(a) Two dimensional trajectory of the parafoil system(easy case)



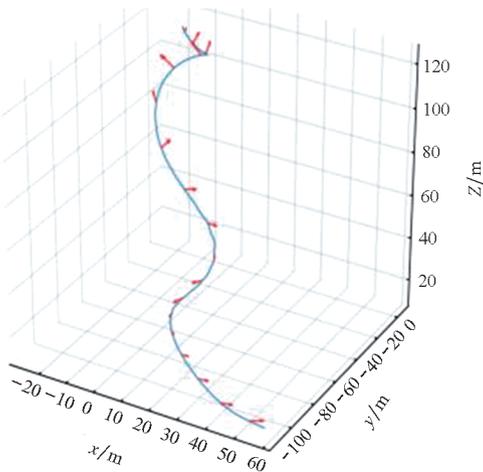
(b) 翼伞三维轨迹(简单案例)

(b) Three dimensional trajectory of the parafoil system(easy case)



(c) 翼伞二维轨迹(困难案例)

(c) Two dimensional trajectory of the parafoil system(hard case)



(d) 翼伞三维轨迹(困难案例)

(d) Three dimensional trajectory of the parafoil system(hard case)

图14 经过 ALHAT 训练采样获得的翼伞飞行轨迹<sup>[66]</sup>Fig. 14 Flight trajectory of the parafoil obtained by sampling through ALHAT training<sup>[66]</sup>

对于在复杂环境中完成协同任务的无人机而言,智能路径规划也是一个关键问题。常见的方法是使用进化计算(evolutionary computation, EC)和 DRL 来进行单个或多个无人机的路径规划研究。Cekmez 等<sup>[67]</sup>采用  $K$ -means 聚类方法在地形中寻找控制点,使用并行遗传算法求解多无人机路径规划问题,该算法的优点是在计算统一设备架构(compute unified device architecture, CUDA)上运行,可以实现更快地进行实验。但  $K$ -means 聚类的使用会限制区域划分,强烈依赖于初始化参数。于是, Sathyan 等<sup>[68]</sup>将遗传算法与模糊逻辑相结合,提出一种更为有效的遗传模糊算法,解决了每架无人机在操作结束时返回起点的问题。另外, Luo 等<sup>[69]</sup>提出了一种基于 Deep-Sarsa 的无人机路径规划与避障方法,在仿真平台上测试结果表明该方法在动态障碍环境下具有良好的效果。

总体而言,翼伞系统和无人机的航迹规划方法在最新的研究中都采用了智能算法对归航轨迹的优化。智能算法通过多次迭代求解出问题的最优解,是一种成熟的全局优化算法,具有鲁棒性高和广泛适应性的特点。后续的研究中若能解决其计算量大、规划时间长和实时性差等难题,将非常适合应用于航迹规划问题。

## 4 翼伞系统轨迹跟踪控制

在翼伞系统精确数学建模和合理航迹规划基

础上,轨迹跟踪控制是实现自主归航的关键部分,控制系统的合理设计将决定翼伞系统是否准确沿预定的航迹飞行。

无动力翼伞轨迹跟踪控制系统仅由伞衣后缘下偏的偏转控制单通道构成,而动力翼伞系统的轨迹跟踪控制增加了依靠推力电机提供的高度控制通道。相对于无动力翼伞系统,动力翼伞系统的精确控制更为困难,其难点在于纵向推力与横向下偏控制之间存在非线性的耦合关系。推力输入会影响纵向速度和改变同等下偏量时的转弯速度,从而影响系统的稳定性。而改变翼伞后缘下偏量,横向转弯半径变化的同时,也会导致纵向高度的变化,特别是当系统受到风扰作用时,两者之间的耦合作用更加显著。因此,翼伞控制系统的鲁棒性和抗干扰性是高精度轨迹跟踪的研究重点。

目前,国内外对翼伞系统的轨迹跟踪控制也逐渐趋于成熟,主要分为传统控制策略和基于深度学习、机器学习等智能控制策略,如表4所示。

表4 翼伞系统控制策略

Tab. 4 Parafoil system control strategy

分类	轨迹跟踪控制策略
传统控制策略	比例 - 积分 - 微分 <sup>[70-72]</sup> (proportional-integral-derivative, PID)、自抗扰 <sup>[73-74]</sup> (active disturbance rejection control, ADRC)、滑模控制 <sup>[75]</sup> (sliding mode control, SMC)等
智能控制策略	神经网络、深度 Q 网络 (deep Q-network, DQN)、蒙特卡罗等

### 4.1 传统控制策略

早期国内外的翼伞系统轨迹跟踪控制研究主要采用 PID 作为主要控制方法。随着国内韩京清教授提出了 ADRC 控制理论,翼伞系统控制的工程应用范围也因此得到了拓宽。

在半实物仿真实验中对比 PID 和 ADRC 两种轨迹跟踪控制算法,如图 15 所示。翼伞系统工作在风场环境时,传统 PID 控制算法难以实现理想的控制效果,系统在轨迹跟踪时存在静差,并且在转弯时偏离参考航迹,控制量的波动也较大,难以保持系统稳定。ADRC 控制器可以通过内部的扩张状态观测器观测系统的扰动并进行动态补偿,相对于 PID 控制器提高了系统跟踪精度和抗扰动能力,但是其控制量仍存在一定程度的波动。因此,为了改进传统 ADRC 的控制效果,孙青林

等<sup>[76]</sup>设计了一种动力翼伞系统横纵向的双通道自抗扰串级控制器,考虑了横向通道电机扰动的存在,在 8-DOF 模型的基础上加入了带负载转矩的直流电机模型。控制器内外环的回路可以减少系统调节时间,提高了抗干扰能力和控制精度。通过半实物仿真的实验结果可知,串级自抗扰控制器在跟踪精度、响应速度和抵抗扰动上效果突出,控制系统的性能得到了明显提升。

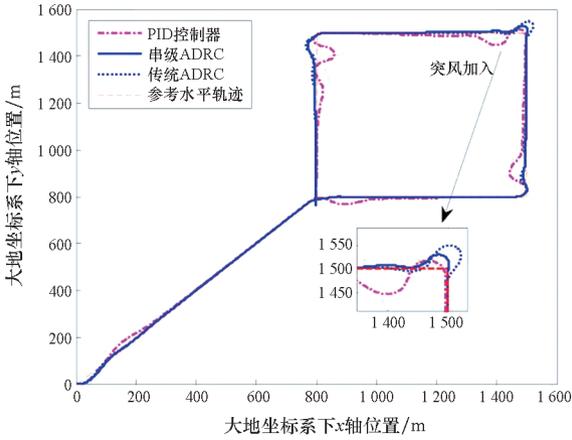


图 15 PID 和 ADRC 的水平轨迹<sup>[70]</sup>

Fig. 15 Horizontal trajectory of PID and ADRC<sup>[70]</sup>

Slegers 等<sup>[77]</sup>提出了一种基于模型预测的翼伞轨迹跟踪控制策略,该策略通过预测获得了翼伞系统自主归航的轨迹及其对应的控制逻辑。经过三次不同轨迹的飞行实验,结果表明模型预测控制也是一种有效的翼伞系统控制方法。

除以上三种控制策略外,还有无模型自适应控制和滑模控制。相比 PID、ADRC 及模型预测控制,无模型自适应控制在随机干扰环境下,控制器的跟踪误差和超调量更小<sup>[78]</sup>;SMC 在复杂飞行任务中需要随时改变航向和提升推力时,控制器的响应和收敛速度更快<sup>[79]</sup>。

#### 4.2 智能控制策略

智能控制策略在翼伞系统轨迹跟踪中得到了部分应用,如深度学习、机器学习和其他智能算法作为优化方法。一般来说,在确定控制系统架构后,可以将控制器设计问题转化为优化问题,利用智能算法求解和优化控制器参数,以提高翼伞系统的轨迹跟踪性能和抗扰动能力。如钱克昌等<sup>[80]</sup>提出了一种基于神经网络的非线性动态逆翼伞控制方法,利用神经网络的逼近原则建立翼伞逆控制系统,被控系统经线性化解耦后再结合 PID 闭环控制器,控制器结构如图 16 所示。在阵风干扰情况下进行动态系统仿真,翼伞系统仍能按照指令稳定飞行,证明了其良好的控制效果。

这种控制方法适用于难以获得精确的翼伞动力学模型和复杂的输入和输出耦合等情况。

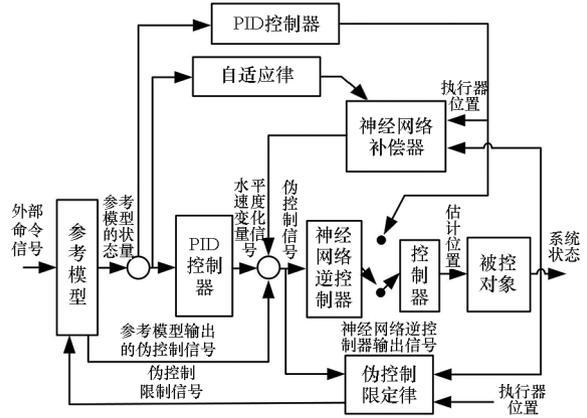


图 16 基于神经网络的控制器结构<sup>[80]</sup>

Fig. 16 Controller structure based on neural network<sup>[80]</sup>

Zheng 等<sup>[81]</sup>提出了一种基于线性主动干扰抑制 (linear active disturbance rejection control, LADRC) 的二阶控制器,并应用 DQN 算法实时优化控制器参数,控制器结构如图 17 所示。在阵风干扰情况下进行仿真,通过与传统的 LADRC 控制器对比,发现该方法在控制器响应时间和超调量方面具有一定的优势。

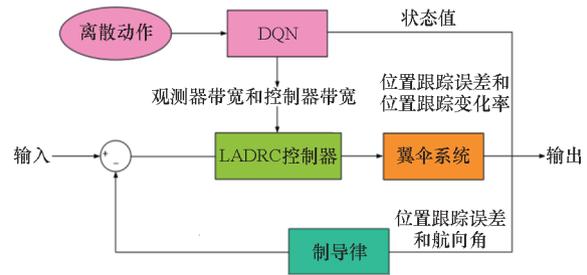


图 17 基于 DQN 的 LADRC 控制器结构<sup>[81]</sup>

Fig. 17 Structure of LADRC controller based on DQN<sup>[81]</sup>

旋翼无人机的控制设计面临非线性、多输入多输出、耦合子系统、动力学不确定性、风扰动等问题,与翼伞系统的跟踪控制问题类似,传统控制技术已不能满足需求,目前已提出许多新型控制技术来提高其性能。如终端滑模控制 (terminal sliding mode control, TSMC) 可使跟踪误差更快收敛、消除抖振、提高计算效率、对有界参数变化不敏感<sup>[82]</sup>;而非奇异快速终端滑模控制 (nonsingular terminal sliding mode control, NTSMC) 不仅具有 TSMC 的优点,还能够更好地提高系统响应速度和控制精度<sup>[83]</sup>。

基于神经网络的非线性控制器可以提供超先

验自适应控制性能,如 Jia 等<sup>[84]</sup>提出了一种基于逆推法和动态面控制技术相结合的分布式输出反馈编队控制协议,利用自适应神经网络对未知函数进行补偿,并设计了一个神经网络状态观测器来估计不可测的内部状态。DRL 策略也被用于训练神经网络来控制四旋翼飞行器,如 Hwangbo 等<sup>[85]</sup>提出的 DRL 算法具有保守性和稳定性,在复杂任务中表现优异。

### 4.3 智能控制系统

虽然智能控制策略已经开始涉足翼伞轨迹跟踪控制研究,但大多数智能控制策略还停留在仿真阶段,尚未广泛应用在实际飞行任务中。智能控制算法的计算效率一直是现代控制设计的关键特征。然而,翼伞控制系统的硬件限制了智能控制算法的应用,因为目前轨迹跟踪控制器硬件的核心主要为嵌入式数字微控制器,如意法半导体 32 位微控制器 (ST microelectronics 32-bit microcontroller, STM32)、数字信号处理 (digital signal processing, DSP)、现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 等<sup>[86]</sup>。

边缘人工智能嵌入式硬件的最新进展增加了翼伞系统基于智能算法控制的可能性,如美国乔治福克斯大学与 NASA 合作研发了一种随机翼伞制导控制系统,采用的是 NVIDIA Tegra 3 作为控制器硬件的核心,这是迄今为止首次在翼伞系统中使用图形处理器 (graphical processing units, GPU) 进行实时优化控制<sup>[87]</sup>。该系统基于蒙特卡罗算法实时评估候选规划轨迹的着陆精度、避障效果及鲁棒性,然后求解最优轨迹和实时轨迹跟踪。翼伞控制系统架构如图 18 所示,由 ARM 命令 GPU 执行蒙特卡罗算法,将最优轨迹的跟踪参

数传递给自动驾驶仪并进行内环控制。整个控制系统是模块化的,不会出现相互干扰。此外,这个嵌入式电子设备拥有超过 100 个核心,包括电池在内总质量不到 1 kg。最后进行了仿真实验和实际飞行实验,结果如图 19 所示,黑色曲线表示仿真轨迹,右边梯形红框为障碍区域,绿色曲线表示翼伞系统接近障碍区域时,GPU 首次更新优化,使用精确的初始条件模拟的轨迹,其中模拟轨迹与实际飞行轨迹相似。可以发现,实际轨迹未能很好地跟踪所需的偏转命令,这是由于内环控制器的误差较大引起的,可以通过反馈轨迹规划以减小跟踪误差。

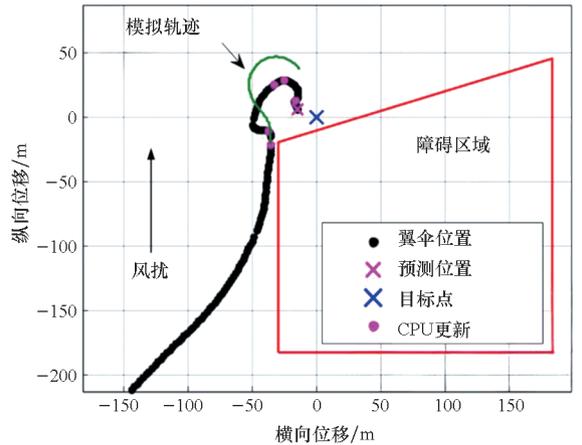


图 19 启用 GPU 制导的水平飞行轨迹<sup>[87]</sup>

Fig. 19 Flight path with GPU guidance enabled<sup>[87]</sup>

与翼伞智能控制系统类似,现代无人机在使用机器学习、深度学习和其他类型的算法执行复杂的图像处理 and 实时物体检测等任务时,也需要计算密集型处理的高速多核处理器系统,如 GPU、FPGA、全可编程 SoC (all programmable systems-on-chip, APSoCs)、SoC-FPGA 等,以高效地处理复杂任务<sup>[88]</sup>。Karakostas<sup>[89]</sup>使用树莓派 3B 单板计算机作为无人机的计算平台,将长短时记忆 (long short-term memory, LSTM) 神经网络和自主控制器软件都运行在单板计算机上,探索无人机在没有依赖着陆系统或 GPS 等外部设施的情况下自主控制其飞行行为的能力。初步结果表明,在单板计算机中嵌入 LSTM 以实现无人机的自主飞行具有一定的潜力。

综上所述,翼伞轨迹跟踪控制研究是一个涉及多个学科的复杂问题,需要结合翼伞的动力学、控制理论和智能算法等多方面的知识进行研究。轨迹跟踪控制的方案丰富多样,不同控制方案的控制效果也不尽相同,将传统控制策略与智能控制策略进行组合式设计成为主流,但仍需考虑翼

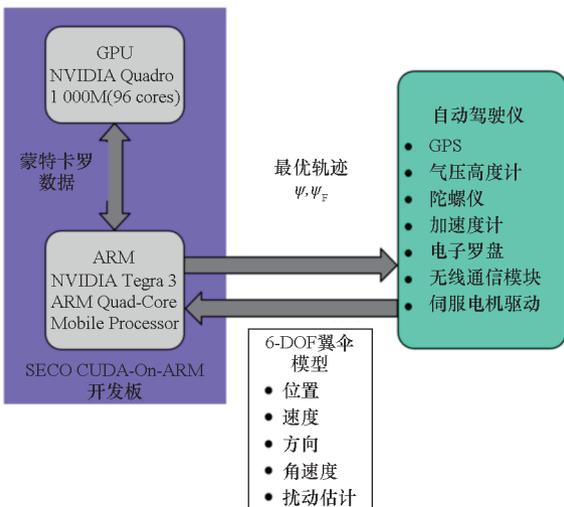


图 18 翼伞控制系统架构<sup>[87]</sup>

Fig. 18 Parafoil control system architecture<sup>[87]</sup>

伞系统的应用场景及性能指标,选出合理的控制方案来进行轨迹跟踪控制。

## 5 未来研究工作展望

### 5.1 基于 CFD 的建模及数值模拟飞行实验

对于环境干扰因素和相对运动较小的翼伞系统而言,多体系统建模方法基本满足控制系统的设计要求。但对于复杂环境且相对运动较大的翼伞系统而言,基于 CFD 柔性建模方法能够更好地满足控制系统的设计要求。采用有限元方法分析翼伞与流场之间的相互耦合,获取翼伞系统的气动力,是理想的“数值模拟风洞”。但目前仅考虑了复杂环境下对翼伞系统动力学模型的影响,未曾考虑控制策略对模型的影响。Ren 等<sup>[90]</sup>提出了一种流体编辑技术,该技术使用 DRL 算法实现。该方法有效地解决了控制策略在不同的模拟环境下泛化能力不足的问题,并实现了复杂环境下 FSI 系统的多任务控制策略。因此,如何将流体编辑技术与建模理论和智能控制策略相结合,用于翼伞动力学建模和数值模拟飞行实验是未来的研究方向。

### 5.2 障碍空间内的实时动态航迹规划

随着人工智能技术快速的更迭发展,近年来兴起的智能优化算法应用在翼伞系统的航迹规划中,具有鲁棒性高、适应性强等特点<sup>[91]</sup>。You 等<sup>[92]</sup>提出了一种基于态势空间的无人机三维路径规划方法,旨在为高度机动的无人机在动态环境中找到可靠的、无碰撞的路径。该方法可以在目标跟踪和软着陆的前提下,在 8 ms 内规划出平滑飞行的路径,满足无人机实时的动态避障需求。因此,对于翼伞系统而言,不仅需要规划从起始投放点到目标点的最优轨迹,还需要规划翼伞在飞行过程中的任意位置到目标点的最优轨迹。未来的研究重点将是实现对翼伞系统在障碍空间内的实时动态航迹规划。

### 5.3 边缘计算平台的智能跟踪控制及三维可视化仿真

传统控制策略容易实现,在实际应用上占据主导地位,但是对翼伞动力学模型精度的要求较高。智能控制策略基于数据驱动不需要进行精确建模,但这类方法需要高性能且低功耗的嵌入式硬件给予支撑。因此,如何利用边缘人工智能计算主板实现对轨迹的高精度敏捷跟踪,并具有较好的鲁棒性和抗干扰能力,是今后翼伞系统自主归航研究的重点。同时,未来应该更进一步探索

翼伞系统自主归航的三维可视化仿真,国内在这方面相关的研究较少<sup>[93]</sup>。完整的翼伞系统三维可视化仿真应包括三维视景模型、翼伞动力学模型、控制归航系统模型以及外界干扰模型。

## 6 总结

根据国内外翼伞系统三个阶段发展现状,引出了翼伞系统自主归航的三项关键技术,即翼伞系统建模、航迹规划以及轨迹跟踪控制,重点综述了三项关键技术的基本原理、代表性研究方法和前沿研究,并指出了每项关键技术理论研究及实际应用上遇到的难题。针对翼伞系统的强耦合、非线性、大时滞、不确定扰动及多约束综合影响等问题,采用基于 CFD 柔性建模技术的系统模型,并进行动态航迹规划以应对障碍空间,以及基于智能算法设计轨迹跟踪控制器,以进一步提升翼伞系统的实际开发应用水平。

## 参考文献 (References)

- [1] XUE X P, WEN C Y. Review of unsteady aerodynamics of supersonic parachutes[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 125: 100728.
- [2] HEINRICH G A, VOGT S, LAWRENCE N R J, et al. In-wing pressure measurements for airspeed and airflow angle estimation and high angle-of-attack flight[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2022, 45(6): 1033 - 1045.
- [3] JASMINE R, NICOLE V, ANTONIO S. An approach to the preliminary sizing and performance assessment of spaceplanes' landing parafoils[J]. Aerospace, 2022, 9(12): 823.
- [4] PAUL T, ROLAND S. An aero-structural model for ram-air kite simulations[J]. Energies, 2023, 16(6): 2603.
- [5] ZHU H, SUN Q L, SUN H, et al. Aerodynamic prediction for flight dynamics simulation of parafoil system and airdrop test validation[J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111: 11065 - 11085.
- [6] KNACKE T W. Parachute recovery systems design manual[R]. Naval Weapons Center China Lake CA, 1991.
- [7] ÜRGÜN S, GÖKDEMİR M, FIDAN S. Comparative analysis and manufacturing of airfoil structures suitable for use at low speeds[J]. Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences, 2022, 8(4): 600 - 613.
- [8] CARTER D, GEORGE S, HATTIS P, et al. Autonomous guidance, navigation and control of large parafoils[C]//Proceedings of the 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2005.
- [9] BERLAND J C, DUNKER S, GEORGE S, et al. Development of a low cost 10 000 lb capacity ram-air parachute, DRAGONFLY program[C]//Proceedings of the 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2005.
- [10] CLEMINSON J. Precision aerial delivery systems: modeling, dynamics, and control[J]. The Aeronautical Journal, 2017, 121(1244): 1579 - 1583.
- [11] 滕海山, 汤国建, 刘涛, 等. 翼伞系统线目标归航方法[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(3): 1 - 6.

- TENG H S, TANG G J, LIU T, et al. Line target homing method of parafoil system[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(3): 1–6. (in Chinese)
- [12] 焦猛, 王立武, 滕海山, 等. 基于翼伞回收助推器的遥控遥测系统设计[J]. *航天返回与遥感*, 2021, 42(1): 65–73.
- JIAO M, WANG L W, TENG H S, et al. Remote control and telemetry system design based on parafoil recovery booster[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(1): 65–73. (in Chinese)
- [13] 李春, 吕智慧, 黄伟, 等. 精确定点归航翼伞控制系统研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(4): 1331–1335.
- LI C, LYU Z H, HUANG W, et al. Guidance navigation & control system for precision fix-point homing parafoil[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(4): 1331–1335. (in Chinese)
- [14] CACAN M R, COSTELLO M, WARD M, et al. Human-in-the-loop control of guided airdrop systems[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 1141–1149.
- [15] 吴卓, 张文博, 王治国, 等. 一种大型冲压式翼伞的设计与试验[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(3): 348–355.
- WU Z, ZHANG W B, WANG Z G, et al. Design and testing of a large parafoil[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(3): 348–355. (in Chinese)
- [16] TAO J, DEHMER M, XIE G M, et al. A generalized predictive control-based path following method for parafoil systems in wind environments[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 42586–42595.
- [17] TANAKA K, TANAKA M, IWASE A, et al. A rational polynomial tracking control approach to a common system representation for unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(2): 919–930.
- [18] YAN L Q, SONG Y G, WANG H J, et al. Dynamics modeling and autonomous landing for flexible parafoil-vehicle multibody system[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 43945–43961.
- [19] REDELINGHUYS C. A flight simulation algorithm for a parafoil suspending an air vehicle[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2007, 30(3): 791–803.
- [20] TAO J, LIANG W, SUN Q L, et al. Modeling and control of a powered parafoil in wind and rain environments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(4): 1642–1659.
- [21] ZHU H, SUN Q L, LIU X F, et al. Fluid-structure interaction-based aerodynamic modeling for flight dynamics simulation of parafoil system[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 104: 3445–3466.
- [22] GOODRICK T F. Theoretical study of the longitudinal stability of high-performance gliding airdrop systems[C]//*Proceedings of the 5th Aerodynamic Deceleration Systems Conference*, 1975.
- [23] YANG H, SONG L, CHEN W F. Research on parafoil stability using a rapid estimate model[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(5): 1670–1680.
- [24] REDKAR S, FIEDLER B. Control design and simulation framework for an autonomous paramotor UAV[C]//*Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2022.
- [25] LI Y H, ZHAO M, YAO M, et al. 6-DOF modeling and 3D trajectory tracking control of a powered parafoil system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 151087–151105.
- [26] LV F K, HE W L, ZHAO L G. An improved nonlinear multibody dynamic model for a parafoil-UAV system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 139994–140009.
- [27] TAN P L, SUN M W, SUN Q L, et al. Dynamic modeling and experimental verification of powered parafoil with two suspending points[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 12955–12966.
- [28] OCHI Y. Modeling and simulation of flight dynamics of a relative-roll-type parafoil[C]//*Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020.
- [29] PRAKASH O. Modeling and simulation of high altitude winged airship-payload system using 9-DOF multibody model[C]//*Proceedings of the AIAA SCITECH 2023 Forum*, 2023.
- [30] TOGLIA C, VENDITTELLI M. Modeling and motion analysis of autonomous paragliders[R/OL]. [2022-09-28]. [https://rosa.uniroma1.it/rosa00/index.php/dis\\_technical\\_reports/article/view/8850/8821](https://rosa.uniroma1.it/rosa00/index.php/dis_technical_reports/article/view/8850/8821).
- [31] VISHNIAK A. Simulation of the payload-parachute-wing system flight dynamics[C]//*Proceedings of the Aerospace Design Conference*, 1993.
- [32] 杨海鹏, 贺卫亮. 翼伞系统十五自由度动力学建模与仿真[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(1): 45–52.
- YANG H P, HE W L. Modeling and simulation of 15-DOF parafoil dynamics[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(1): 45–52. (in Chinese)
- [33] 张青斌, 高峰, 郭锐, 等. 动力翼伞系统拟坐标形式的多体动力学建模[J]. *兵工学报*, 2019, 40(9): 1935–1942.
- ZHANG Q B, GAO F, GUO R, et al. Multibody dynamics modeling of powered parafoil system using equations with quasi-coordinates[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(9): 1935–1942. (in Chinese)
- [34] RADEMACHER B J, LU P, STRAHAN A L, et al. In-flight trajectory planning and guidance for autonomous parafoils[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(6): 1697–1712.
- [35] JANN T. Aerodynamic coefficients for a parafoil wing with arc anhedral-theoretical and experimental results[C]//*Proceedings of the 17th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar*, 2003.
- [36] NICOLAIDES J D. Parafoil wind tunnel tests: AFFDL-TR-70-146[R]. [s. n.], 1971.
- [37] BURK S M, WARE G M. Static aerodynamic characteristics of three ram-air-inflated low-aspect-ratio fabric wings: NASA-TN-D-4182[P]. 1967-09-01.
- [38] IACOMINI C, CERIMELE C. Longitudinal aerodynamics from a large scale parafoil test program[C]//*Proceedings of the 15th Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference*, 1999.
- [39] MADSEN C, SOSTARIC R, CERIMELE C. Flight performance, aerodynamics, and simulation development for the X-38 parafoil test program[C]//*Proceedings of the 17th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar*, 2003.
- [40] LOLIES T, CHARLOTTE M, GOURDAIN N. A fluid structure interaction methodology to design paragliders and parachutes[C]//*Proceedings of the 26th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference*, 2022.
- [41] ZHAO L G, TAO J, SUN H, et al. Dynamic modelling of parafoil system based on aerodynamic coefficients

- identification [J]. *Automatika*, 2023, 64(2): 291 – 303.
- [42] 张思宇, 余莉, 刘鑫. 翼伞充气过程的流固耦合方法数值仿真 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(6): 1108 – 1115.
- ZHANG S Y, YU L, LIU X. Numerical simulation of parafoil inflation process based on fluid-structure interaction method [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(6): 1108 – 1115. (in Chinese)
- [43] ZHU H, SUN Q L, TAO J, et al. Flexible modeling of parafoil delivery system in wind environments [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2022, 108: 106210.
- [44] GAO H T, TAO J. A novel trajectory planning method for parafoil airdrop system based on geometric segmentation strategy [J]. *Mathematical and Computational Applications*, 2022, 27(5): 75.
- [45] 罗淑贞, 孙青林, 檀盼龙, 等. 基于高斯伪谱法的翼伞系统复杂多约束轨迹规划 [J]. *航空学报*, 2017, 38(3): 320363.
- LUO S Z, SUN Q L, TAN P L, et al. Trajectory planning of parafoil system with intricate constraints based on Gauss pseudo-spectral method [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(3): 320363. (in Chinese)
- [46] GOODRICK T F. Wind effect on gliding parachute systems with non-proportional automatic homing control; AD 698456 [R]. Natick: Airdrop Engineering Laboratory US Army Natick Laboratories, 1969.
- [47] GOODRICK T. Estimation of wind effect on gliding parachute cargo systems using computer simulation [C] // Proceedings of the 3rd Aerodynamic Deceleration Systems Conference, 1970.
- [48] GOODRICK T F, PEARSON A, MURPHY A L, Jr. Analysis of various automatic homing techniques for gliding airdrop systems with comparative performance in adverse winds [C] // Proceedings of the 4th Aerodynamic Deceleration Systems Conference, 1973.
- [49] LI Y L, LIN H B. Theoretical investigation of gliding parachute trajectory with deadband and non-proportional automatic homing control [C] // Proceedings of the 11th Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, 1991.
- [50] 胡文治, 陈建平, 张红英, 等. 翼伞系统分段归航轨迹的优化设计 [J]. *航空计算技术*, 2017, 47(6): 55 – 59.
- HU W Z, CHEN J P, ZHANG H Y, et al. Design and optimization in multiphase homing trajectory of parafoil system [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2017, 47(6): 55 – 59. (in Chinese)
- [51] SLEGERS N J, YAKIMENKO O A. Optimal control for terminal guidance of autonomous parafoils [C] // Proceedings of the 20th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2009.
- [52] 高海涛, 张利民, 孙青林, 等. 基于伪谱法的翼伞系统归航轨迹容错设计 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(6): 702 – 708.
- GAO H T, ZHANG L M, SUN Q L, et al. Fault-tolerance design of homing trajectory for parafoil system based on pseudo-spectral method [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(6): 702 – 708. (in Chinese)
- [53] CLEMINSON J R. Path planning for autonomously-guided parafoils: a dynamic programming approach [C] // Proceedings of AIAA Aerodynamic Decelerator Systems (ADS) Conference, 2013.
- [54] 蒋华晨, 梁海燕, 曾德堂, 等. 翼伞系统威胁规避最优归航轨迹设计 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(7): 955 – 962.
- JIANG H C, LIANG H Y, ZENG D T, et al. Design of the optimal homing trajectory of a parafoil system considering threat avoidance [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(7): 955 – 962. (in Chinese)
- [55] 谢亚荣, 吴庆宪, 姜长生, 等. 粒子群算法在翼伞空投系统航迹规划中的应用 [J]. *航空兵器*, 2010, 17(5): 7 – 10, 18.
- XIE Y R, WU Q X, JIANG C S, et al. Application of particle swarm optimization algorithm in route planning for parafoil airdrop system [J]. *Aero Weaponry*, 2010, 17(5): 7 – 10, 18. (in Chinese)
- [56] LUDERS B D, SUGEL I, HOW J P. Robust trajectory planning for autonomous parafoils under wind uncertainty [C] // Proceedings of the AIAA Infotech @ Aerospace (I@A) Conference, 2013.
- [57] FOWLER L, ROGERS J. Bézier curve path planning for parafoil terminal guidance [J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2014, 11(5): 300 – 315.
- [58] BENNETT T W, FOX R, Jr. Design, development & flight testing of the NASA X – 38 7500 ft<sup>2</sup> parafoil recovery system [C] // Proceedings of the 17th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2003.
- [59] YANG L Y, ZHAO X G, GU F, et al. Multi-phase homing optimal control for parafoil system [C] // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2016: 1343 – 1348.
- [60] 陈奇, 赵敏, 李宇辉, 等. 基于梯度下降法的翼伞系统最优分段航迹规划 [J]. *航空学报*, 2020, 41(12): 324226.
- CHEN Q, ZHAO M, LI Y H, et al. Optimal segment constant trajectory planning for parafoil system based on gradient descent method [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 324226. (in Chinese)
- [61] 赵志豪, 赵敏, 陈奇, 等. 基于IAFSA的四自由度翼伞分段归航设计 [J]. *火力与指挥控制*, 2017, 42(2): 64 – 68.
- ZHAO Z H, ZHAO M, CHEN Q, et al. Design in multiphase homing of 4-DOF parafoil system based on improved artificial fish-swarm algorithm [J]. *Fire Control & Command Control*, 2017, 42(2): 64 – 68. (in Chinese)
- [62] 高峰, 郭锐, 丰志伟, 等. 翼伞系统 5 段归航轨迹优化研究 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(5): 1025 – 1033.
- GAO F, GUO R, FENG Z W, et al. Optimization design of homing trajectory of parafoil system with five segments [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(5): 1025 – 1033. (in Chinese)
- [63] HE W C, WEN J Y, TAO J, et al. A combined homing trajectory optimization method of the parafoil system considering intricate constraints [J]. *Automation*, 2022, 3(2): 269 – 285.
- [64] 李宇辉, 赵敏, 陈奇, 等. 复杂环境下翼伞系统的组合式航迹规划 [J]. *航空学报*, 2021, 42(6): 324566.
- LI Y H, ZHAO M, CHEN Q, et al. Combined trajectory planning of parafoil systems in complex environments [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(6): 324566. (in Chinese)
- [65] 张超, 刘生东, 刘佳琪, 等. 基于改进 A\* 算法的翼伞航迹规划研究 [J]. *计算机仿真*, 2015, 32(1): 60 – 63, 131.
- ZHANG C, LIU S D, LIU J Q, et al. Research on modified A\* algorithm based path planning for parafoil system [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(1): 60 – 63, 131. (in Chinese)

- [66] PARK J, LEE S, KIM Y, et al. Hazard avoidance landing of loaded parafoil using deep reinforcement learning [C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum, 2022.
- [67] CEKMEZ U, OZSIGINAN M, SAHINGOZ O K. Multi-UAV path planning with parallel genetic algorithms on CUDA architecture [C]//Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion, 2016: 1079–1086.
- [68] SATHYAN A, ERNEST N D, COHEN K. An efficient genetic fuzzy approach to UAV swarm routing [J]. Unmanned Systems, 2016, 4(2): 117–127.
- [69] LUO W, TANG Q R, FU C H, et al. Deep-sarsa based multi-UAV path planning and obstacle avoidance in a dynamic environment [C]//Proceedings of 9th International Conference, 2018: 102–111.
- [70] GURSOY G, PRACH A, YAVRUCUK I. Design of a waypoint tracking control algorithm for parachute-payload systems [C]//Proceedings of the 2nd CEAS Specialist Conference on Guidance, Navigation & Control, 2013.
- [71] HENDERSON C R. Feasibility of tactical air delivery resupply using gliders [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2016.
- [72] MA Y X, LIU J H, ZHANG W S, et al. Research on trajectory control of parafoil systems based on active disturbance rejection control [C]//Proceedings of 2022 Chinese Intelligent Systems Conference, 2022: 251–265.
- [73] LONG X Y, SUN M W, PIAO M N, et al. Parameterized trajectory optimization and tracking control of high altitude parafoil generation [J]. Energies, 2021, 14(22): 7460.
- [74] SUN H, SUN Q L, SUN M W, et al. Accurate modeling and homing control for parafoil delivery system based on wind disturbance rejection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(4): 2916–2934.
- [75] LI Z H, NAN Y. Optimal path planning and tracking control methods for parafoil [J]. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8115.
- [76] 孙青林, 陈赛, 孙昊, 等. 复杂扰动下的动力翼伞轨迹跟踪控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(7): 1319–1326.
- SUN Q L, CHEN S, SUN H, et al. Trajectory tracking control of powered parafoil under complex disturbances [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(7): 1319–1326. (in Chinese)
- [77] SLEGGERS N, COSTELLO M. Model predictive control of a parafoil and payload system [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(4): 816–821.
- [78] ZHAO L G, HE W L, LV F K. Model-free adaptive control for parafoil systems based on the iterative feedback tuning method [J]. IEEE Access, 2021, 9: 35900–35914.
- [79] SUN Q L, YU L, ZHENG Y M, et al. Trajectory tracking control of powered parafoil system based on sliding mode control in a complex environment [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 122: 107406.
- [80] 钱克昌, 陈自力, 李建. 基于神经网络动态逆的动力伞飞行控制方案 [J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(4): 59–62.
- QIAN K C, CHEN Z L, LI J. Flight control scheme based on dynamic inversion of neural network for power parafoil [J]. Aerospace Control and Application, 2010, 36(4): 59–62. (in Chinese)
- [81] ZHENG Y M, TAO J, SUN Q L, et al. Deep-reinforcement-learning-based active disturbance rejection control for lateral path following of parafoil system [J]. Sustainability, 2022, 15(1): 435.
- [82] MAARUF M, MAHMOUD M S, MA'ARIF A. A survey of control methods for quadrotor UAV [J]. International Journal of Robotics and Control Systems, 2022, 2(4): 652–665.
- [83] HOU Z W, LU P, TU Z J. Nonsingular terminal sliding mode control for a quadrotor UAV with a total rotor failure [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 98: 105716.
- [84] JIA Z Y, WANG L L, YU J Q, et al. Distributed adaptive neural networks leader-following formation control for quadrotors with directed switching topologies [J]. ISA Transactions, 2019, 93: 93–107.
- [85] HWANGBO J, SA I, SIEGWART R, et al. Control of a quadrotor with reinforcement learning [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(4): 2096–2103.
- [86] 郭林, 孙青林, 陈赛, 等. 基于实时多任务操作系统的动力翼伞系统设计 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(16): 227–234.
- GUO L, SUN Q L, CHEN S, et al. Design of powered parafoil system based on real-time multitask operating system [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(16): 227–234. (in Chinese)
- [87] SLEGGERS N, BROWN A, ROGERS J. Experimental investigation of stochastic parafoil guidance using a graphics processing unit [J]. Control Engineering Practice, 2015, 36: 27–38.
- [88] AHMED F, JENIHIN M. A survey on UAV computing platforms: a hardware reliability perspective [J]. Sensors, 2022, 22(16): 6286.
- [89] KARAKOSTAS B. Control of autonomous UAV using an onboard LSTM neural network [J]. Journal of Ubiquitous Systems & Pervasive Networks, 2023, 18(1): 9–14.
- [90] REN B, YE X H, PAN Z R, et al. Versatile control of fluid-directed solid objects using multi-task reinforcement learning [J]. ACM Transactions on Graphics, 2022, 42(2): 1–14.
- [91] WANG Y, YANG C X, YANG H. Neural network-based simulation and prediction of precise airdrop trajectory planning [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 120: 107302.
- [92] YOU S X, GAO L P, DIAO M. Real-time path planning based on the situation space of UCAVs in a dynamic environment [J]. Microgravity Science and Technology, 2018, 30: 899–910.
- [93] 郑成. 翼伞飞行运动建模与翼伞空投控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- ZHENG C. Research on parafoil modeling and control technology of parafoil airdrop system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)