

引用格式: 张良阳, 李占科, 韩海洋. 微型无人机栖息设计技术综述[J]. 航空学报, 2023, 44(12): 027573. ZHANG L Y, LI Z K, HAN H Y. A review of perching technology of micro-UAV[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(12): 027573 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2022.27573

微型无人机栖息设计技术综述

张良阳, 李占科*, 韩海洋

西北工业大学 航空学院, 西安 710072

综述

摘要: 微型无人机栖息设计研究对提升微型无人机续航、增强微型无人机环境适应性和提高微型无人机长时间侦察监视能力具有重要的意义。随着人们对微型无人机续航性能和复杂环境的适应性要求越来越高, 科研工作者对微型无人机的栖息设计技术进行了深入研究, 并取得了显著成果。主要梳理了微型无人机的栖息原理、栖息机构、栖息方法, 分析了栖息机构的特点与发展趋势。同时介绍了变体无人机在栖息领域的研究, 并阐述了无人机栖息与抓取和爬壁之间的联系。此外将无人机分为多旋翼和固定翼2大类来进行栖息方法的研究分析, 内容主要包括无人机的栖息位置选择、基于时间接触理论的仿生轨迹设计、视觉栖息导航、无人机的气动分析和动力学建模以及相应的栖落机动控制等。通过对无人机栖息设计技术的研究归纳分析, 可为后续从事该方面的研究人员提供参考和借鉴。

关键词: 微型无人机; 栖息原理; 栖息机构; 栖息方法; 变体无人机; 抓取; 爬壁

中图分类号: V279⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2023)12-027573-26

微型无人机具有体积小、质量轻、成本低、可操作性强等优点, 广泛应用于航空摄像^[1]、电力巡检^[1]、地理测绘^[2]、火情侦察^[2]、桥梁检测^[3]等场景。但因其气动效率低、所携带的电池能源有限等, 微型无人机的续航性能较差。科研人员为了解决微型无人机续航较短的问题, 对微型无人机进行了基于不同栖息原理的栖息机构和栖息方法研究, 并得到一系列研究成果。本文主要对近年发展的微型无人机栖息原理、机构设计和栖息方法进行总结, 重点分析微型无人机栖息机构的特点与发展趋势, 同时也对变体无人机在栖息方面进行了研究和综述, 最后阐述了无人机栖息与抓取和爬壁之间的联系。

1 微型无人机栖息原理

微型无人机主要靠栖息机构栖息到目标物体

上, 栖息机构的作用原理也不尽相同。文献[4]将爬壁机器人的吸附机理主要分为4大类, 负压吸附、磁吸附、抓扣式吸附和仿生吸附。本文则在此基础上将微型无人机的栖息原理进一步发展归纳为7类, 主要为:

- 1) 机械抓扣式: 通过伺服电机驱动机械抓扣机构使无人机完成主动或被动栖息。
- 2) 仿生机械抓扣式: 以鸟类为原型设计的仿生机械抓扣机构使无人机完成栖息。
- 3) 仿生针刺、微棘式: 通过模仿生物刚毛而设计的微型针刺、微棘钩刺到粗糙的表面来栖息。
- 4) 负压吸盘式: 利用吸盘产生的负压使无人机栖息到目标物体上。
- 5) 螺旋桨式: 利用旋翼电机产生的吸附力使

收稿日期: 2022-06-04; 退修日期: 2022-06-27; 录用日期: 2022-07-29; 网络出版时间: 2022-08-03 14:25

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2023/V44/I12/27573>

基金项目: 陕西省重点研发计划(2021ZDLGY09-06)

* 通信作者: E-mail: lzk@nwpu.edu.cn

无人机完成栖息。

6) 粘胶式:利用干胶产生的粘附力使无人机完成栖息。

7) 电磁式:利用强磁铁或电磁器件产生的电磁力使无人机完成栖息。

通过将栖息过程分为栖息前、栖息中、栖息后3个部分来分别阐述不同栖息机构的原理。

1.1 机械抓扣式、仿生机械抓扣式栖息过程

栖息前:无人机首先选择目标栖息物体,然后伺服电机打开机械抓扣机构,使抓扣机构保持张开状态。

栖息中:无人机调整姿态,使抓扣机构对准目标栖息物体,依靠自身重力完成被动栖息或者通过自身动力实现主动栖息,抓扣机构闭合的同时锁死机构,完成栖息。

栖息后:打开锁死机构,然后再打开抓扣机构,调整无人机姿态,准备复飞。

1.2 仿生针刺、微棘式栖息过程

栖息前:无人机首先选择目标栖息物体,然后探测物体表面。

栖息中:无人机调整姿态,降低水平和垂直速度,进行超机动挂壁,使针刺或微棘机构钩刺到壁面并将机构锁死,最后完成栖息。

栖息后:打开锁死机构,使针刺或微棘机构回归初始位置,调整无人机姿态,准备复飞。

1.3 负压吸盘式栖息过程

栖息前:无人机首先选择目标栖息物体,探测无人机到栖息物体表面的距离。

栖息中:无人机调整姿态,使负压吸盘对准目标栖息物体表面,操纵无人机撞击目标栖息物体表面,通过撞击排出吸盘内部空气进而形成负压,同时将机构锁死,完成栖息。

栖息后:先对锁死的机构释放,然后通过伺服电机打开吸盘一角,使空气进入吸盘解除负压,调整无人机姿态,准备复飞。

1.4 螺旋桨式栖息过程

栖息前:无人机首先选择目标栖息物体,然

后对壁面探测并分析,为超机动壁面吸附做准备。

栖息中:无人机调整姿态,进行超机动壁面吸附,通过旋翼产生的吸附力使无人机完成倾斜或垂直表面上的栖息。

栖息后:通过改变旋翼转速或旋翼电机倾斜角调整无人机姿态,实现无人机从倾斜或垂直表面分离,准备复飞。

1.5 粘胶、电磁式栖息过程

栖息前:无人机首先选择目标栖息物体,电磁式机构要对其充电、充磁。

栖息中:调整无人机姿态,使粘胶或电磁机构对准目标栖息物体,操纵无人机对目标栖息物体表面撞击,通过撞击力使粘胶粘附到物体表面完成栖息并锁死机构,或电磁机构对目标物体的电磁与静电力来吸附完成栖息。

栖息后:粘胶式则是打开锁死机构,消除外向力或伺服电机拉开粘胶垫与壁面,使无人机与栖息物体分离,电磁式则进行消磁或断电来使无人机与栖息物体分离,最后调整无人机姿态,准备复飞。

不同栖息原理所对应的机构首先需要选择目标栖息物体,再对栖息物的表面探测,调整飞机姿态使栖息机构对准目标栖息物体,然后设定栖息轨迹操纵无人机靠近目标栖息物体,借助栖息机构完成栖息。无人机栖息过程的主要执行者基于不同栖息原理机构,再通过其他技术方法如栖息轨迹设计、气动分析与栖息控制等来辅助无人机完成整个栖息动作。

2 微型无人机栖息机构

2.1 机械抓扣式栖息机构

机械抓扣式栖息是借助伺服电机驱动机械抓扣机构抓扣到被栖息物体,进而使无人机完成栖息。机械抓扣式栖息飞行平台主要是多旋翼无人机,少数是固定翼无人机和直升机。最早出现的机械抓扣机构由富兰克林·欧林工程学院Culler等^[5]提出,该起落架机构可使四旋翼无人机栖息在树枝状结构上,是一种咬爪机制,该机

时间的监控。为解决无人机机械设计和自主边缘检测方面的挑战,讨论了可能的解决方案,机械抓扣机构如图5所示^[10]。奥克兰大学Lin等^[11]为提升多旋翼无人机在农业等领域长时间的监视能力,设计了一种可将无人机栖息在农场柱子上的机构并进行了试验验证,机构如图6所示^[11]。该机构的静态试验和飞行测试表明无人机一旦悬停,该设计可以承受风力,并且无人机栖息控制精度决定其能否栖息成功。

约翰·霍普金斯大学应用物理试验室Popek等^[12]开发了一种集成机器人感知、机械抓取和基于视觉路径规划的无人机,可使无人机在复杂环境中栖息。创新设计的机械抓取机构结合了被动和主动抓取,使电源在关闭的情况下也能保持对栖息目标物体的抓取,机械抓取机构如图7所示^[12]。耶鲁大学Hang等^[13]提出了一个模块化驱动的起落架框架,通过栖息将无人机稳定在各种不同的结构上。试验结果表明,该框架可用于无人机在一组常见结构的栖息,该设计能有效降低功耗、提高姿势的稳定性,并在高处栖息时可保持较大的视野范围,结构如图8所示^[13]。科罗拉



图5 泰勒大学机械抓扣机构^[10]

Fig. 5 Mechanical grasping mechanism of Taylor's University^[10]



图6 奥克兰大学机械抓扣机构^[11]

Fig. 6 Mechanical grasping mechanism of University of Auckland^[11]



图7 约翰·霍普金斯大学机械抓扣机构^[12]

Fig. 7 Mechanical grasping mechanism of Johns Hopkins University^[12]

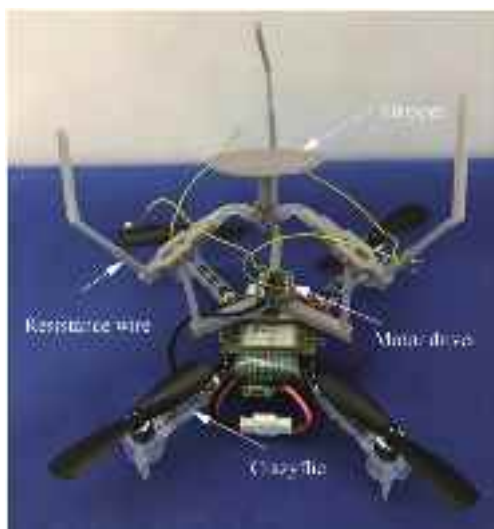
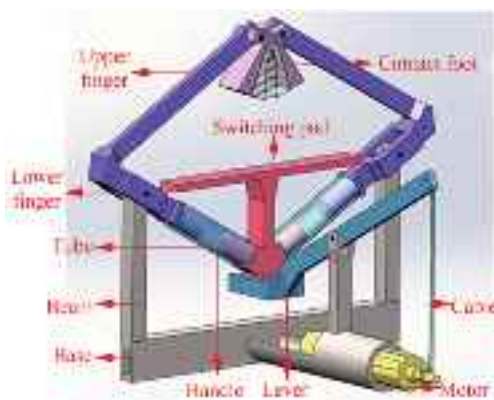


图8 耶鲁大学的模块化起落架机构^[13]

Fig. 8 Modularized landing gears mechanism of Yale University^[13]

多州立大学Zhang等^[14]提出了一种可抓取在圆柱物体上的柔顺双稳抓取机构,该抓取机构易于关闭、调整、保持稳定,在栖息过程中通过冲击力直接启动抓取机构,试验结果表明该抓取机构能成功实现无人机在圆柱物体上栖息以及抓取物体,结构如图9所示^[14]。同时Zhang等^[15]提出了另一种抓取机构—新型双稳态抓取机构,适用于范围更广的栖息物体,对于高度较小的物体可采用环绕法来包围物体实现栖息,对于高度较大的物体采用夹持法并利用摩擦力进行栖息,机构如图10所示^[15]。

悉尼大学Yu等^[16]提出一种具有2个自由度的柔性机械抓取机构,可模仿鸟类的抓取和栖息,结构如图11所示^[16]。抓取机构的对称构形使得在抓取和栖息过程中,重心移动较小、对平台角动量的扰动较小,试验结果表明该机械抓取机

图9 科罗拉多州立大学机械抓扣机构^[14]Fig.9 Mechanical grasping mechanism of Colorado State University^[14]图10 科罗拉多州立大学新型新稳态机械抓扣机构^[15]Fig.10 A new steady state mechanical grasping mechanism of Colorado State University^[15]图11 悉尼大学的柔性机械抓取机构^[16]Fig.11 Compliant mechanical grasping mechanism of University of Sydney^[16]

构具有栖息和抓取能力。犹他大学Kitchen等^[17]研究了一种双钩固定装置,该装置通过2个欠驱动钳口机械爪抓取并栖息到电力电缆,将电缆与

充电线圈对齐,从电缆的电磁场中获取能量,结构如图12所示^[17]。阿卜杜勒·拉赫曼·新月会科学技术研究所Magesh等^[18]提出了一种基于形状记忆聚合物的伸缩式起落架用于无人机的栖息,并对栖息性能进行了测试,结果表明使用拉伸式卡爪可达到的最小拉力与普通卡爪相差了27.6%。这种新颖设计确保了曲率的最大期望变形,与普通夹持器相比差异为35.8%,结构如图13所示^[18]。

洛桑联邦理工学院智能系统试验室Kovač等^[19]提出了一种固定翼无人机栖息机构,该机构可使无人机栖息在天然和人造材料的墙壁上,并在各种基材上进行了110次连续栖息,成功率100%,机构如图14所示^[19]。洛桑联邦理工学院工程学院Stewart等^[20]提出了一种用于固定翼无人机被动栖息的储能机构,包含能量回收的存储机构和用于栖息在水平杆上的爪子。试验验证了爪子在栖息期间重新获得5%的动能,同时

图12 犹他大学机械抓扣机构^[17]Fig.12 Mechanical grasping mechanism of University of Utah^[17]图13 阿卜杜勒·拉赫曼·新月会科学技术研究所机械抓取机构^[18]Fig.13 Mechanical grasping mechanism of Abdur Rahman Crescent Institute of Science and Technology^[18]

表明该装置可在较宽的偏航角度范围内成功停靠,并实现了以 7.4 m/s 的速度进行栖息,结构如图 15 所示^[20]。耶鲁大学工程与应用科学学院 Backus 等^[21]提出了一种可用于直升机的机械抓取机构,研究了设计和抓取参数如肌腱路线/滑轮比率等对完全驱动和欠驱动设计性能的影响。结果表明完全驱动设计对栖息应用效果更好,增加机构的宽度可改善栖息和抓取性能,结构如图 16 所示^[21]。



图 14 洛桑联邦理工学院智能系统实验室栖息机构^[19]
Fig. 14 Perching mechanism of Laboratory of Intelligent Systems, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne^[19]



图 15 洛桑联邦理工学院工程学院机械抓取机构^[20]
Fig. 15 Mechanical grasping mechanism of School of Engineering, École Polytechnique Fédérale de Lausanne^[20]

2.2 仿生机械抓扣式栖息机构

随着仿生学的发展,衍生出了仿生机械抓扣式栖息。人们通过观察鸟类的栖息,学习鸟类在各种复杂物体表面上的栖息活动,进行仿生机械设计。曼彻斯特大学 Nagendran 等^[22]首次提出了一种基于生物灵感的腿部着陆系统概念,利用

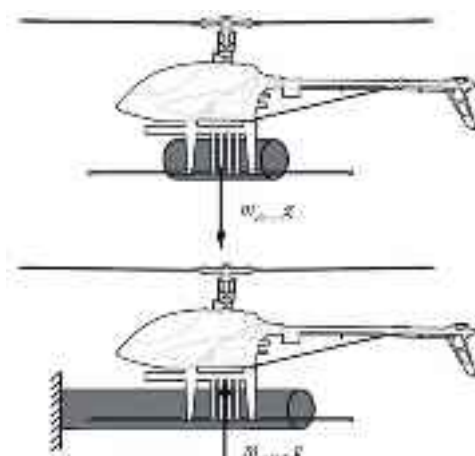


图 16 耶鲁大学工程与应用科学学院机械抓扣机构^[21]
Fig. 16 Mechanical grasping mechanism of School of Engineering and Applied Science, Yale University^[21]

机械杆件和弹簧阻尼器实现对鸟腿的仿生设计,进而实现无人机栖息着陆的功能,如图 17 所示^[22]。南洋理工大学机械与航空工程学院的 Chi 等^[23]更系统地 from 鸟类栖息中获得灵感,进一步提出一种仿生自适应栖息机构的设计,结构如图 18 所示^[23],并将无人机的栖息序列概括为 3 个阶段,预栖、栖息和去栖息,结果表明该栖息机构适用于大范围的栖息角度和直径目标。犹他大学的 Doyle 等^[24]提出了一种可被动栖息的仿生机械结构,如图 19 所示^[24],整个机构由欠驱动的抓取脚和折叠的腿组成,借助无人机的重量转化为肌腱张力进而驱动脚来完成无人机栖息,结果表

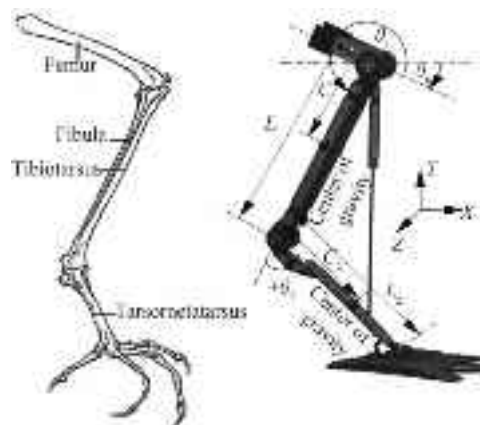


图 17 曼彻斯特大学仿生机械腿^[22]
Fig. 17 Bird-inspired perching landing gear of University of Manchester^[22]



图 18 南洋理工大学机械与航空工程学院仿生机械爪^[23]
Fig. 18 Bio-inspired adaptive perching mechanism of School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University^[23]



图 19 犹他大学仿生机械抓扣机构^[24]
Fig. 19 Mechanical grasping mechanism of University of Utah^[24]

明无人机可被动地在多种表面栖息。新墨西哥州立大学的Xie等^[25]提出了一种由绳索驱动的腿部机构和绳索驱动的欠驱动脚部组成的仿生机械抓取机构,如图20所示^[25],并建立了脚趾执行力与各指骨接触力之间的关系模型,结果表明该设计对无人机仿生栖息技术具有基础性的贡献。

奥林工程学院Nadan等^[26-27]开发了一种混合经验-计算模型,并设计了欠驱动多节段脚机构,该机构既能使无人机抓取并栖息在树枝状物体

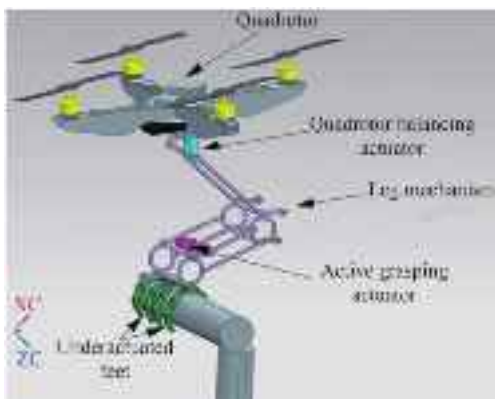


图 20 新墨西哥州立大学仿生机械抓扣机构^[25]
Fig. 20 Bio-inspired perching mechanism of New Mexico State University^[25]

上,同时该模型又能预测并量化抓取所施加的力,试验结果表明无人机可栖息在一系列目标物体上,结构如图21所示^[26-27]。奥克兰大学机械工程系新灵巧研究小组McLaren等^[28]提出了一种可被动关闭、自适应的机械手,结构如图22所示^[28],该机械手最大抓持力56 N,能高速固定各种形状的物体,试验表明可以给无人机提供栖息能力并进行自主对接。重庆大学机械传动国家重点实验室Bai等^[29]借鉴鸟脚结构和运动规律,提出了一种适应性和承载能力强的变形无人机栖息机构,结构如图23所示^[29],试验结果表明该结构能可靠地栖息在各种物体上,且无人机栖息能耗为悬停时的0.015倍。斯坦福大学机械工程



图 21 奥林工程学院仿生机械腿^[26-27]
Fig. 21 Bird-inspired perching landing gear of Olin College of Engineering^[26-27]

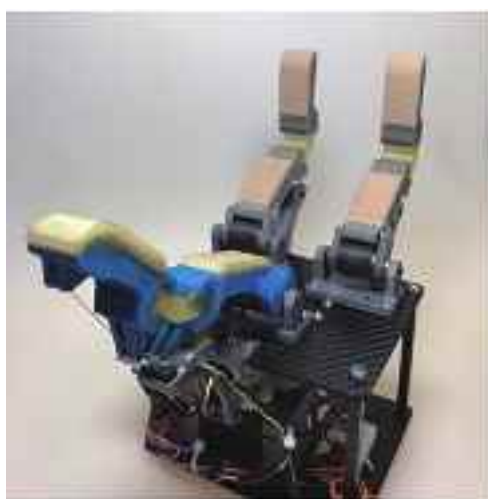


图 22 奥克兰大学新灵巧研究小组仿生机械爪^[28]
Fig. 22 Bio-inspired adaptive perching mechanism of New Dexterity Research Group, University of Auckland^[28]

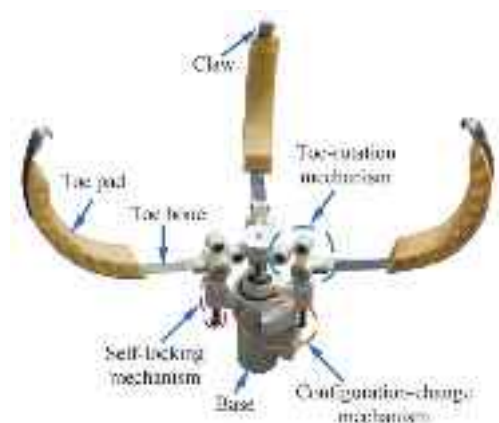


图 23 重庆大学机械传动国家重点实验室仿生机械抓扣机构^[29]

Fig. 23 Bird-inspired mechanical grasping mechanism of State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University^[29]

系 Roderick 等^[30]提出了一种仿生鸟腿的机构设计,能使无人机动态栖息在复杂的表面上并抓取不规则物体,结构如图 24 所示^[30],结果表明该抓握机构能在不到 50 ms 内环绕不规则的物体并栖息。



图 24 斯坦福大学机械工程系机械抓扣机构^[30]

Fig. 24 Mechanical grasping mechanism of Department of Mechanical Engineering, Stanford University^[30]

2.3 仿生针刺、微棘式栖息机构

仿生针刺、微棘式栖息是模仿生物的刚毛钩刺进目标栖息物粗糙表面,进而使无人机完成栖息。斯坦福大学机械工程系 Roderick 等^[31]对在高度不规则表面上栖息、移动和起飞的不同生物方案进行研究,提高了对表面接近和起飞空气动力

力学、栖息和附着接触动力学及表面运动理论分析。通过对动物俯仰着陆动作和表面附着技术的深入研究,为开发栖息在多样化和复杂表面的无人机提供设计指南。西北工业大学无人系统研究院吕敏等^[32]概括了垂面栖息微型无人机的方案特点,并结合针刺式、微棘式这 2 类典型垂面栖息方式阐释了不同栖息原理的着壁、栖息与复飞过程,为后续开展垂面栖息无人机的研究提供借鉴。南京航空航天大学机电学院倪勇等^[33]提出适合各种复杂环境可扑翼飞行和爬行栖息的两栖机器人研究构想,为仿生两栖机器人的微型化和轻量化指出了发展方向。

斯坦福大学 Desbiens 等^[34-37]提出了一种用于固定翼无人机的仿生脚,脚上配备一排微型脊椎针刺,通过针刺与墙壁的凹凸进行啮合使无人机栖息到壁面上,结构如图 25 所示^[34-37],同时还能通过控制仿生脚上的脊椎针刺收放来实现无人机在壁面上的爬行。佛罗里达州立大学工程学院 Dickson 等^[38]基于固定翼无人机开发出一种仿生针刺机构,结构如图 26 所示^[38],无人机通过该机构可在壁面栖息与爬行,且为双足攀爬小型、简化机构设计提供指导。舍布鲁克大学 Mehanovic 等^[39-40]设计了一款可自动栖息并从垂直表面起飞的固定翼无人机,吸附在粗糙墙壁上的主要是微型针刺机构,结构如图 27 所示^[39-40],试验结果表明该无人机能可靠地在粗糙壁面栖息并起飞。

斯坦福大学仿生学和灵巧操作实验室 Pope 等^[41-42]设计了一款可飞行、在壁面栖息、爬行、再次起飞的四旋翼无人机,结构如图 28 所示^[41-42],

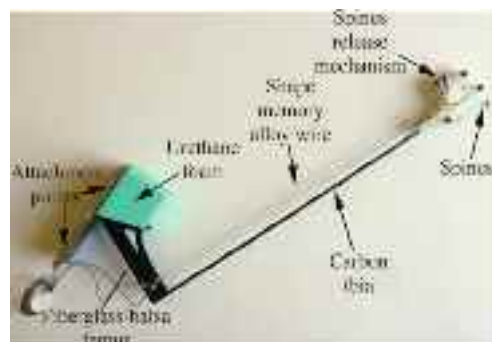


图 25 斯坦福大学仿生脚^[34-37]

Fig. 25 Bird-inspired perching landing gear of Stanford University^[34-37]



图 26 佛罗里达州立大学工程学院仿生针刺机构^[38]
Fig.26 Bionic dart perching mechanism of Florida State University College of Engineering^[38]



图 27 舍布鲁克大学机械抓扣机构^[39-40]
Fig.27 Mechanical grasping mechanism of University of Sherbrooke^[39-40]



图 28 斯坦福大学仿生学和灵巧操作实验室仿生脚^[41-42]
Fig.28 Bionic feet of Department of Mechanical Engineering, Stanford University^[41-42]

该无人机具备从爬行失败中恢复及通过应用空气动力增加可用立足点密度的能力。伦敦帝国学院 Zhang 等^[43]提出了一种带有可发射张力锚机构的多旋翼无人机,结构如图 29 所示^[43],张力锚通过锚定在壁面上使无人机栖息,试验结果验证了该设计的有效性以及在大风环境下的稳定能力。伦敦帝国理工学院空中机器人试验室 Nguyen 等^[44]提出了一种被动自适应栖息机构,可使无人机稳定地附着在包括树枝和管道在内的各种表面上,结构如图 30 所示^[44],结果表明该机构能提供可靠的牵引力和非常高的负载能力并能正常释放。加州理工学院喷气推进试验室 Backus 等^[45]设计了一款带有微棘爪的多旋翼无人机,结构如图 31 所示^[45],该机构可使无人机在粗糙的倾斜或垂直表面栖息,且在自重 100 g 的情况下可抓取超过 10 N 的载荷。



图 29 伦敦帝国学院仿生针刺机构^[43]
Fig.29 Bionic dart perching mechanism of Imperial College London^[43]

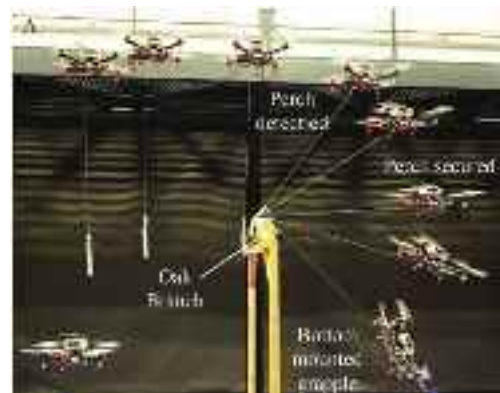


图 30 伦敦帝国学院空中机器人试验室机械抓扣机构^[44]
Fig.30 Mechanical grasping mechanism of Aerial Robotics Laboratory, Imperial College London^[44]

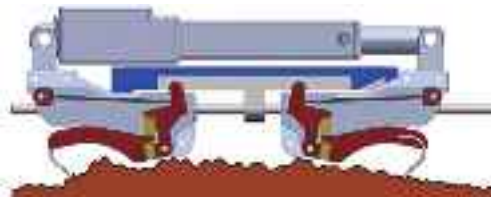


图 31 加州理工学院喷气推进实验室机械抓扣机构^[45]
Fig. 31 Mechanical grasping mechanism of Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology^[45]

2.4 负压吸盘式栖息机构

负压吸盘式栖息利用吸盘和栖息物体之间产生的负压吸附力,使无人机栖息到目标物体。南京理工大学计算机科学与技术系 Liu 等^[46]提出了一种用于飞行和吸附栖息无人机的阻抗控制方法,试验结果表明该控制方法搭配设计的吸盘结构能使无人机实现与壁面的平稳吸附接触和栖息,结构如图 32 所示^[46]。特温特大学 Wopereis 等^[47]设计了一种基于被动真空杯技术吸收空中撞击的机构,结构如图 33 所示^[47],试验结果表明无人机可借助该机构在环境中实现稳定栖息、解除栖息和可靠起飞。日本高级科学技术研究所信息科学学院 Huang 等^[48]提出了一种可使无人机栖息在任务形状表面上的机构,如图 34 所

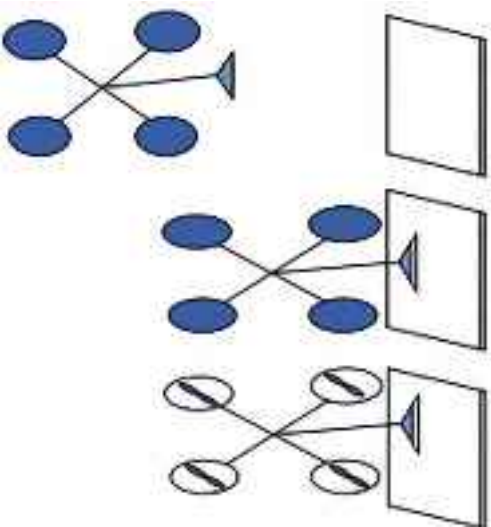


图 32 南京理工大学计算机科学与技术系负压吸盘^[46]
Fig. 32 Vacuum cup of Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology^[46]



图 33 特温特大学负压吸盘^[47]
Fig. 33 Vacuum cup of University of Twente^[47]



图 34 日本高级科学技术研究所信息科学学院负压吸盘^[48]
Fig. 34 Vacuum cup of School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology^[48]

示^[48],该机构由 2 个旋转臂和 4 个真空吸盘组成,且其设计目标是重量轻、模块化、可扩展、自平衡,因此可装配到多种无人机上。

上海交通大学机械与工程学院 Liu 等^[49-50]提出了一种用于空中抓取和栖息的内外双硬度真空杯设计^[49-50],结构如图 35 所示,试验结果表明内外双硬度真空杯吸盘设计要优于传统吸盘,且在抓取和栖息时所需的接触压力显著降低。东



图 35 上海交通大学机械与工程学院负压吸盘^[49-50]
Fig. 35 Vacuum cup of School of Mechanical and Engineering, Shanghai Jiao Tong University^[49-50]

京工业大学系统与控制工程系 Tsukagoshi 等^[51]提出了一种新的混合式吸盘结构,利用粘性粘胶的粘附力和负压吸力来使无人机栖息,结构如图 36 所示^[51],试验表明带有该机构的无人机可栖息到混凝土墙和天花板上并解除栖息复飞。

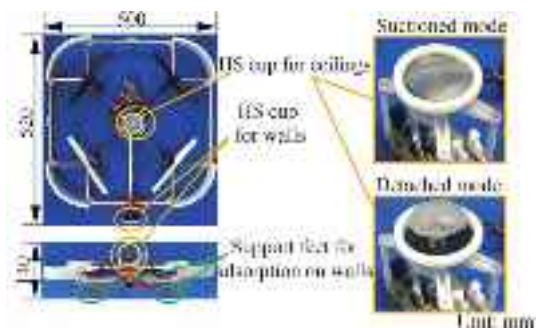


图 36 东京工业大学系统与控制工程系负压吸盘^[51]

Fig. 36 Vacuum cup of Department of Systems and Control Engineering, Tokyo Institute of Technology^[51]

2.5 螺旋桨式栖息机构

螺旋桨式栖息主要是指带有爬壁轮的多旋翼无人机栖息,该类无人机通过旋翼产生的吸附力来吸附到各种壁面上,再通过其搭配的爬壁轮进行壁面爬行。Mathmood 等^[52]综述了螺旋桨式爬壁机器人暨爬壁无人机的相关原理、特点和发展趋势,指出爬壁无人机受壁面性质影响较小,可在许多类型的垂直平面吸附栖息爬行,如光滑、粗糙和铁磁性或非光滑表面。北京航空航天大学机械工程与自动化学院机器人研究所 Ding 等^[53-54]介绍了一种能爬墙和用臂操作的无人机,无人机通过 2 个腿轮机构来实现轮爬壁和腿爬壁 2 种模式,结构如图 37 所示^[53-54]。韩国科学技术研究院 Shin 等^[55]提出了一种可用于建筑结构监测的爬壁无人机,通过无人机在壁面爬行来对建筑进行监测,试验验证了该无人机可在壁面爬行及空中飞行,结构如图 38 所示^[55]。韩国科学技术院土木与环境工程系 Myeong 等^[56-57]设计了一种带有栖息机构的爬壁无人机,结构如图 39 所示^[56-57],该无人机可通过姿态变化和栖息机构在目标物体上栖息、爬行。

日本富士通有限公司 Yamada 等^[58]介绍了一种可用于桥梁检测的爬壁无人机,该无人机带有



图 37 北京航空航天大学机械工程与自动化学院机器人研究所爬壁无人机^[53-54]

Fig. 37 Wall-climbing robot of School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University^[53-54]



图 38 韩国科学技术研究院 Shin 等爬壁无人机^[55]

Fig. 38 Wall-climbing robot of Shin, et al. of Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)^[55]



图 39 韩国科学技术院土木与环境工程系爬壁无人机^[56-57]

Fig. 39 Wall-climbing robot of Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST^[56-57]

1 个圆柱形笼子和 2 个围绕笼子自由旋转的无辐条轮子,结构如图 40 所示^[58],该无人机可检查人难以进入桥梁表面的地方。日本国立理工学院 Iwamoto 等^[59]设计了一种可用来检测隧道的爬壁无人机,该无人机配备了一套橡胶履带可使无人

机在壁面爬行,结构如图41所示^[59]。韩国科学技术院 Jung 等^[60]提出了一种可用于风力发电机桨叶检测的爬壁无人机,无人机借助4个轮子可在桨叶表面粘贴吸附和爬行,结构如图42^[60]所示。

早稻田大学理工系 Tanaka 等^[61]提出了一种带有轮式结构的爬壁无人机,可实现高运动和长期运行,结构如图43所示^[61],试验结果表明该无人机可在复杂环境中平稳爬行和飞行。韩国科



图40 日本富士通有限公司爬壁无人机^[58]

Fig. 40 Wall-climbing robot of Fujitsu Limited^[58]

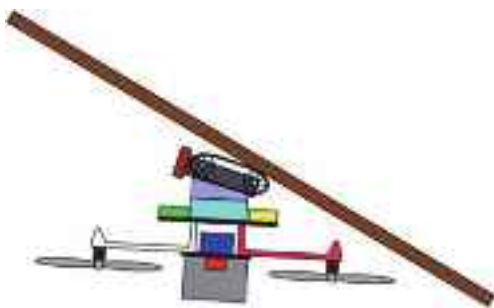


图41 日本国立理工学院爬壁无人机^[59]

Fig. 41 Wall-climbing robot of National Institute of Technology, Ariake College^[59]



图42 韩国科学技术院 Jung 等爬壁无人机^[60]

Fig. 42 Wall-climbing robot of Jung, et al. of Korea Advanced Institute of Science and Technology^[60]

学技术院土木与环境工程系 Myeong 等^[62]提出了一种带有旋转臂的新型爬壁无人机,旋转臂的角度可根据墙体倾斜角进行控制,以实现节能,结构如图44所示^[62],试验表明该无人机可在不同形状的墙壁上爬行。冈山大学自然科学技术研究生院 Watanabe 等^[63]研发了一种既能进行锤击试验又能目视检测的爬壁无人机,结构如图45所示^[63],试验证明该无人机可完成相应的爬行并检测。

吕勒奥理工大学 Andrikopoulos 等^[64]设计了一种电动涵道式吸附机构并为分析与靶面负压和推力产生有关的粘着性质提供了新见解,结构如图46所示^[64],该机构可装配到无人机或者机器人上实现吸附爬壁功能。日本爱媛大学理工科研究生院 Yasunaga 等^[65]设计了一款新型多旋翼

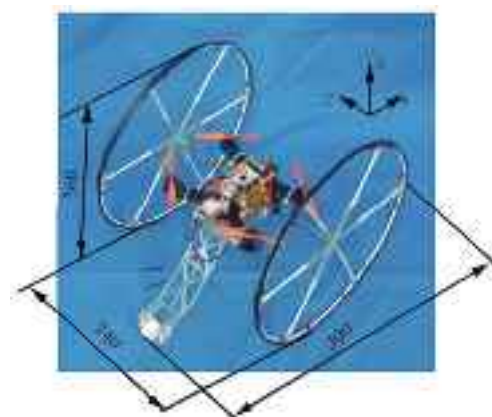


图43 早稻田大学理工系爬壁无人机^[61]

Fig. 43 Wall-climbing robot of Department of Science and Engineering, Waseda University^[61]



图44 韩国科学技术院土木与环境工程系新型爬壁无人机^[62]

Fig. 44 New wall-climbing robot of Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST^[62]

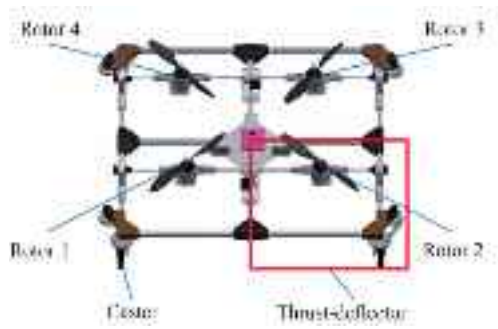


图 45 冈山大学自然科学技术研究生院爬壁无人机^[63]
Fig. 45 Wall-climbing robot of Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University^[63]

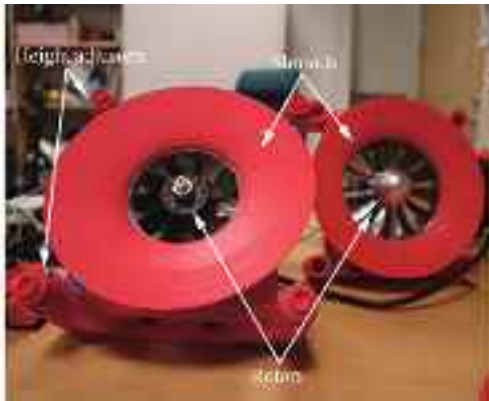


图 46 吕勒奥理工大学爬壁无人机^[64]
Fig. 46 Wall-climbing robot of Lulea University of Technology^[64]

无人机,机身上安装了防护框架和两个主动轮,结构如图 47^[65]所示,试验证明该无人机可在空中飞行、吸附,并在天花板上爬行。韩国科学技术院城市机器人试验室 Myeong 等^[66]设计了一种可改变



图 47 日本爱媛大学理工科研究生院爬壁无人机^[65]
Fig. 47 Wall-climbing robot of Graduate School of Science and Engineering, Ehime University^[65]

旋翼倾转角度的四旋翼无人机,结构如图 48 所示^[66],借助团队提出的通过低速改变姿态在垂直表面上栖息机理和控制算法,实现了无人机在垂直壁面软栖息。

东南大学江苏省工程力学重点试验室 Jiang 等^[67]研究了一种可实时进行裂纹监测的爬壁无人机,该无人机搭配 6 个爬壁轮和 2 个竖直方向的旋翼,进而实现垂直壁面和天花板的爬行,结构如图 49 所示^[67]。伊拉克巴格达工业大学机械工程系 Mahmood 等^[68]提出了一种双旋翼爬壁无

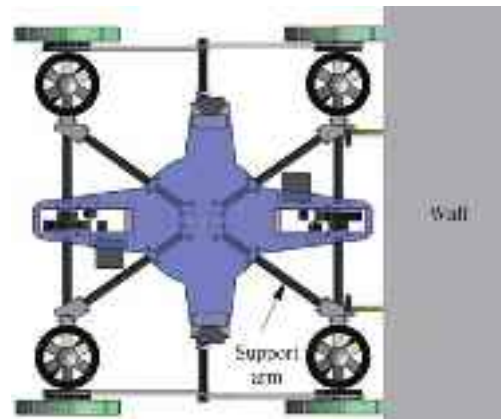


图 48 韩国科学技术院城市机器人试验室爬壁无人机^[66]
Fig. 48 Wall-climbing robot of Urban Robotics Laboratory, KAIST^[66]

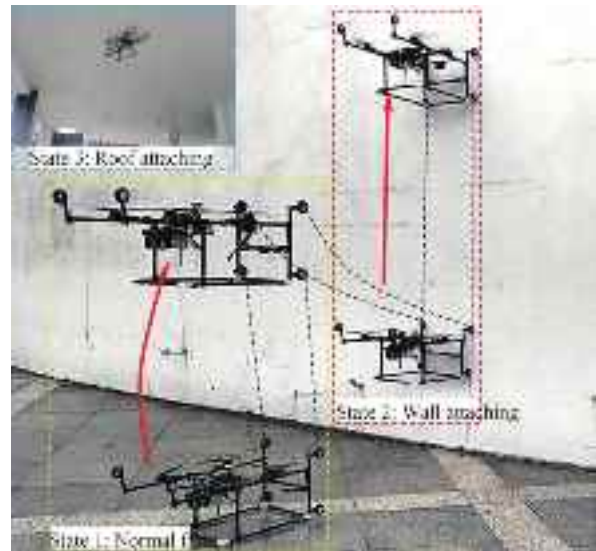


图 49 东南大学江苏省工程力学重点试验室爬壁无人机^[67]
Fig. 49 Wall-climbing robot of Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Southeast University^[67]

人机,结构如图 50 所示^[68],表明该无人机可在不同类型表面栖息和爬行。内盖夫本古里安大学机械工程系 David 等^[69]设计了一种混合飞行与爬行的无人机,搭配的 4 个爬壁驱动轮在旋翼对壁面产生压力的同时进行爬行,结构如图 51 所示^[69],试验证明该无人机可在倾斜或垂直表明爬行。

日本冈山大学自然科学技术研究生院 Ko-mura 等^[70]设计了一种可倾斜的双轴四旋翼无人机,结构如图 52 所示^[70],通过改变旋翼与壁面的倾斜角使无人机吸附到壁面上实现爬行。韩国科学技术院电气工程学院 Lee 等^[71-72]设计了一种带有倾斜机构的三轴六旋翼无人机,结构如图 53 所示^[71-72],该无人机可在悬停时在空中变形,将水平飞行改为垂直飞行,进而在壁面栖息和爬行。纽约大学坦登工程学院 Mao 等^[73]设计了一种可以在倾斜表面上自主栖息的四旋翼无人机,结构如图 54 所示^[73],试验表明该无人机可以在倾斜表面进行激进的栖息。

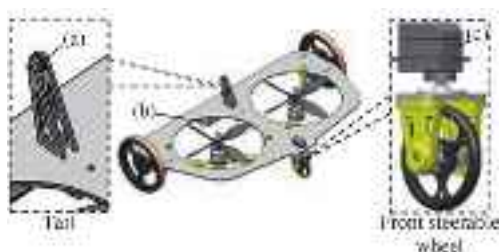


图 50 伊拉克巴格达工业大学机械工程系爬壁无人机^[68]
Fig. 50 Wall-climbing robot of Department of Mechanical Engineering, University of Technology, Baghdad^[68]



图 51 内盖夫本古里安大学机械工程系爬壁无人机^[69]
Fig. 51 Wall-climbing robot of Department of Mechanical Engineering at the Ben Gurion University of the Negev^[69]

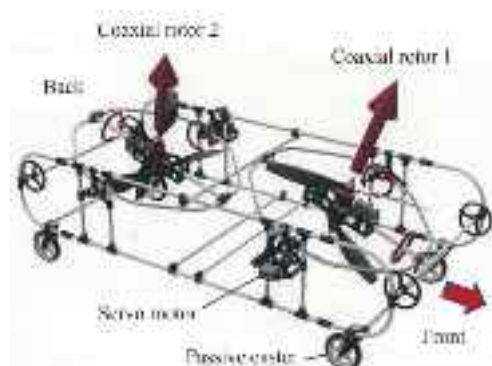


图 52 日本冈山大学自然科学技术研究生院爬壁无人机^[70]
Fig. 52 Wall-climbing robot of Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University^[70]

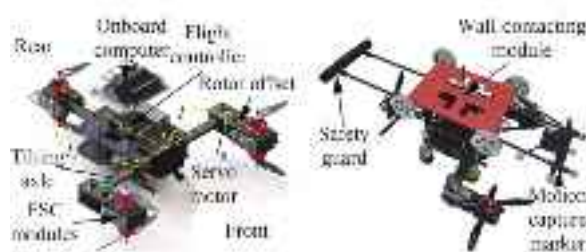


图 53 韩国科学技术院电气工程学院爬壁无人机^[71-72]
Fig. 53 Wall-climbing robot of School of Electrical Engineering, KAIST^[71-72]



图 54 纽约大学坦登工程学院爬壁无人机^[73]
Fig. 54 Wall-climbing robot of Tandon School of Engineering, New York University^[73]

2.6 粘胶、电磁式栖息机构

粘胶、电磁式栖息是借助粘胶垫的粘附力或者电磁铁产生的电磁力吸附到目标物体上,使无人机完成栖息。美国空军学院工程力学系 Anderson 等^[74]设计了一种带粘贴垫的固定翼无人机,结构如图 55^[74]所示,无人机可通过粘贴垫吸附到目标物体上使无人机完成栖息,延长了续航时间可进行长时间的监测。瑞士联邦理工学院智能系统实验室 Daler 等^[75]提出了一种共轴双旋翼无人

机,结构如图 56 所示^[75],该无人机包含 1 个带有纤维基干胶粘剂的粘贴垫和被动自动对准系统,试验证明该无人机可成功栖息。斯坦福大学机械工程专业 Pope 等^[76-77]设计了一种带有干胶垫的多旋翼无人机,结构如图 57 所示^[76-77],可通过干胶垫的粘附力在垂直壁面或倾斜表面上栖息。



图 55 美国空军学院工程力学系粘胶式无人机^[74]

Fig. 55 Sticky-pad plane of Department of Engineering Mechanics, United States Air Force Academy^[74]

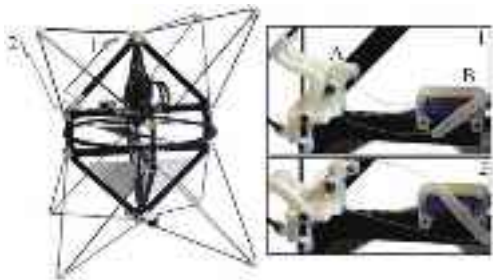


图 56 瑞士联邦理工学院智能系统实验室粘胶式无人机^[75]

Fig. 56 Sticky-pad plane of Laboratory of Intelligent Systems, Swiss Federal Polytechnic in Lausanne^[75]

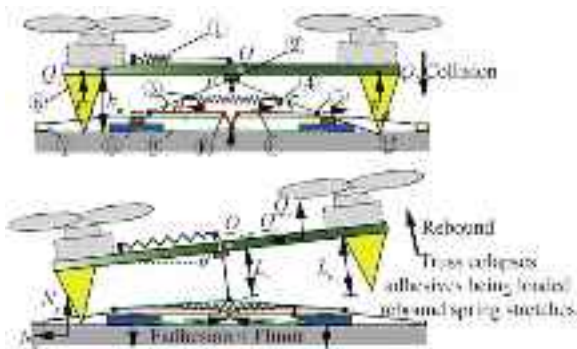


图 57 斯坦福大学机械工程专业粘胶式无人机^[76-77]

Fig. 57 Sticky-pad plane of Mechanical Engineering School, Stanford University^[76-77]

伊利诺伊理工学院机械、材料与航空航天工程系 Kalantari 等^[78]介绍了一种带有新型干胶夹

持器的四旋翼无人机,结构如图 58 所示^[78],无人机通过夹持器上的干胶粘贴在壁面上,试验表明无人机的栖息机动成功率可达 93% 以上。山东科技大学电子通信与物理学院 Guo 等^[79]设计了一种带有仿生干胶的爬壁侦察无人机,干胶抓持器如图 59 所示^[79],试验表明该无人机完全可以实现对粗糙混凝土墙壁吸附栖息。



图 58 伊利诺伊理工学院机械、材料与航空航天工程系粘胶式无人机^[78]

Fig. 58 Sticky-pad plane of Mechanical, Materials, and Aerospace Engineering Department, Illinois Institute of Technology^[78]

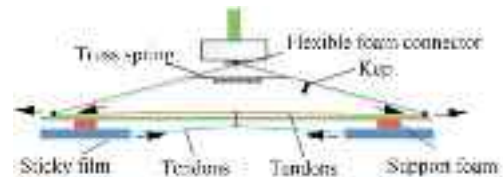


图 59 山东科技大学电子通信与物理学院粘胶式无人机^[79]

Fig. 59 Sticky-pad plane of College of Electronic Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology^[79]

广东工业大学蒋俊高^[80]提出了一种基于四旋翼无人机的仿生壁面自动起降系统,无人机结构如图 60 所示^[80],其通过脚部的微型强磁吸附到壁面进行栖息,试验结果表明无人机可在垂直壁面和倾斜表面实现栖息和起飞。斯坦福大学电气工程系 Park 等^[81]提出了一种用于电胶粘合的特定应用电子电力解决方案,通过产生的静电力来吸附栖息,结论表明四旋翼无人机的无绳索电

粘剂栖息试验结果是首次得到验证并在文献中进行发表,结构如图 61 所示^[81]。哈佛大学 Graule 等^[82]介绍了一种可切换的电粘合剂,该粘合剂几乎可以在任何材料上实现受控的栖息与分离,同时所需的功率比维持飞行低大约 3 个数量级,结构如图 62 所示^[82]。

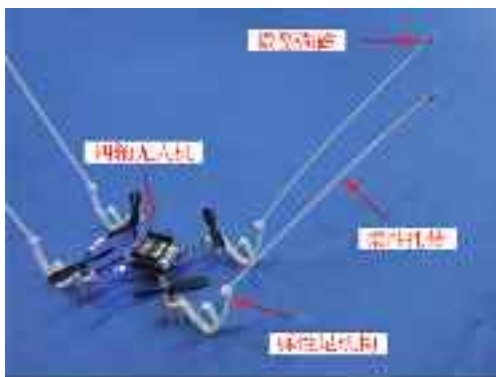


图 60 广东工业大学磁吸式无人机^[80]

Fig. 60 Magnetic MAV of Guangdong University of Technology^[80]

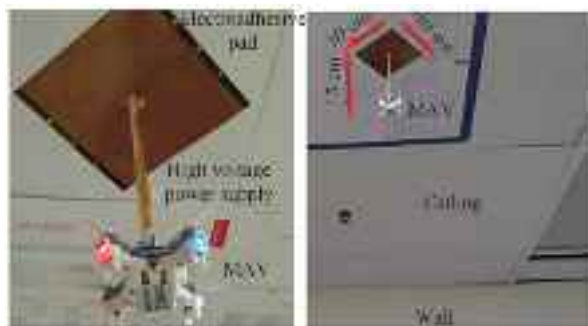


图 61 斯坦福大学电气工程系静电力吸附无人机^[81]

Fig. 61 Electroadhesive perching MAV of Department of Electrical Engineering, Stanford University^[81]

2.7 栖息机构特点及发展趋势

通过上述对不同栖息机构原理进行分类研究分析,总结出以下特点与发展趋势:

1) 机械抓扣式栖息机构所对应的飞行平台多为多旋翼无人机,设计技术相对成熟工程应用较多。基于多旋翼无人机设计的机械抓扣式栖息机构可移植到直升机平台,进行互换。机械抓扣机构模块化设计和形状记忆材料应用将是机械抓扣式栖息机构研究的新方向,通过引入新材



图 62 哈佛大学电磁吸附仿生无人机^[82]

Fig. 62 Bionic electrostatic adhesion MAV of Harvard University^[82]

料和模块化设计使无人机环境适应性更强、功能更齐全。基于固定翼无人机的机械抓扣机构设计会愈发考虑能量的回收再利用,在固定翼无人机栖息时利用机械抓扣机构将能量储存,并在解除栖息和复飞时使用。

2) 仿生机械抓扣式栖息机构所对应的飞行平台多为多旋翼无人机,未来的研究可将飞行平台转为扑翼机或固定翼无人机。将仿生机械爪移植到扑翼机上实现扑翼机对复杂环境的栖息着陆及目标物的抓取,实现更彻底的仿生无人机设计。同时也可将仿生材料引入到仿生机械抓扣的设计中,如人工肌肉等,实现对鸟类更深入的模仿设计。

3) 机械抓扣式栖息机构和仿生机械抓扣式栖息机构都可改变为抓取机构,搭配多旋翼无人机或者直升机在目标物体上定点悬停进行抓取,通过对目标物体的抓取来实现无人机栖息或运输载荷。

4) 基于螺旋桨式栖息无人机多为多旋翼无人机,通过其自带的爬壁轮机构可在倾斜或者垂直壁面上爬行。该类型栖息最大的特点是无人机可在栖息物体表面爬行,进而完成一定的任务。爬壁无人机栖息更多的是一种动态栖息,旋翼电机不停车,在壁面栖息的能耗相对悬停时稍低。因此可通过加装其他栖息机构,如负压吸盘等机构等,借助吸盘对栖息物体产生的负压来实现在壁面上的停车进而提高续航时间。未来基于螺旋桨式栖息的多旋翼无人机可向变体无人

机方向发展,通过改变机体结构或者旋翼电机的倾转角度来实现更好的栖息与壁面爬行。

5) 基于电磁吸附的栖息机构可应用到更微型的仿生无人机上,如基于飞行昆虫或小型鸟类所设计的仿生无人机或扑翼机。通过携带电磁吸附机构可使用比悬停所需功率小3个量级的栖息功率来完成栖息操作,进而实现无人机的长时间续航。

6) 不同作用原理的栖息机构设计将越来越多元化,相互之间可进行组合设计。将针刺或者微棘的机构整合到机械或仿生机械抓扣机构,在抓取的同时利用针刺或者微棘来增大摩擦力来实现更好的栖息或抓取载荷。可将粘胶垫结合到机械或者仿生机械抓扣机构,在栖息或抓取的同时增加粘胶垫的粘附力。也可将电磁式栖息机构整合到基于螺旋桨式栖息的无人机,增大对金属壁面的吸附力。不同种类的栖息机构界限越来越不明显,相反,应对不同栖息场景的组合设计会越来越多。

3 变体无人机栖息方案

美国空军研究试验室Reich等^[83]描述了一种用于栖息微型无人机的机械化机翼概念,结构如图63所示^[83],机翼能够在2个跨距关节上旋转,以模拟鸟类在栖息中的翅膀运动,研究表明该机翼可使无人机以近乎为0的垂直和水平速度栖息在树枝等目标物上。哈佛大学Manchester等^[84]提出了一种具有可变前掠翼无人机,结构如图64^[84]所示,通过前掠翼角变化来提升无人机在大迎角栖息机动时的操作性能。布里斯托尔大学航空航天工程系Greatwood等^[85]提出了一种可变后掠翼无人机,结构如图65所示^[85],飞行试验表明可变后掠翼设计能使无人机在栖息时的俯仰机动达到30°的前扫掠,栖息的最后时刻空速可降至3 m/s以下,远低于9 m/s的失速速度。南京航空航天大学自动化学院袁亮^[86]研制了一种可改变主翼位置的变体无人机,并对其栖息机动进行建模和轨迹优化,结果表明变体部件能够显著提高姿态操纵效率进而改善栖息机动性能,结构如图66所示^[86]。

康奈尔大学Garcia等^[87-88]讨论了变体无人机

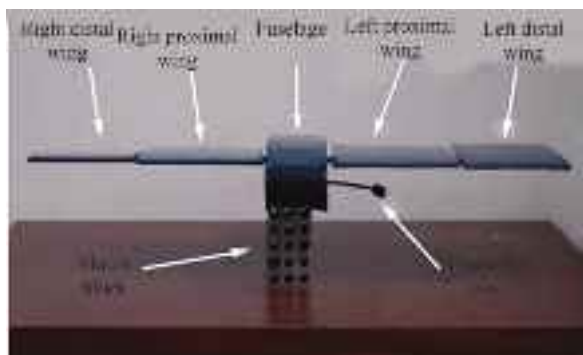


图 63 美国空军研究试验室变体机翼^[83]

Fig. 63 Variable wing of America Air Force Research Laboratory^[83]

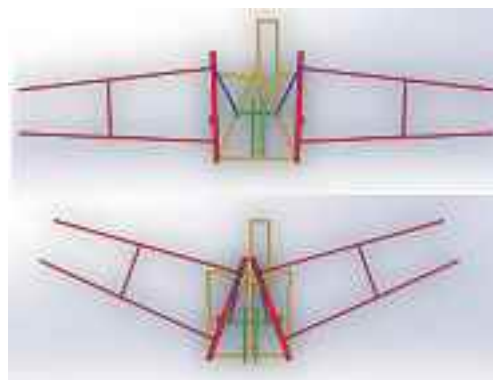


图 64 哈佛大学变体机构^[84]

Fig. 64 Variable mechanism of Harvard University^[84]



图 65 布里斯托尔大学航空航天工程系变体无人机^[85]

Fig. 65 Morphing UAV of Department of Aerospace Engineering, University of Bristol^[85]

空气动力学的综合模型,特别考虑了非线性影响,为高度非线性无人机控制奠定了基础,结果表明利用失速后飞行的能力和无人机重新配置,在没有高推力的情况下垂直栖息着陆是可能的。南京航空航天大学自动化学院何真等^[89]对变体无人机栖息机动纵向的运动进行了建模、仿真和分析,建立了变体无人机栖息机动的纵向多体动



图 66 南京航空航天大学自动化学院变体无人机^[86]
Fig. 66 Morphing UAV of College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics^[86]

力学模型,通过理论计算和分析验证了变体结构能提高无人机栖息机动性能。同时何真等^[90]采用轨迹线性化和张量积变换方法转换得到 T-S 模糊模型,对非变体和变体下的栖落机动控制过程进行了仿真,结果表明带有变体结构的无人机能提高栖落机动中升降舵抗饱和能力,具有更强的操纵性能。

4 微型无人机栖息方法

4.1 多旋翼无人机

4.1.1 栖息位置选择

新加坡国立大学机械工程系 Wang 等^[91]提出一种用于多旋翼无人机离线栖息位置选择的方法,来选择感兴趣的栖息地,选择方法分为预选和精选,并在选择过程中同时考虑几何和任务约束,包括相机范围、屋顶面积、坡度和视线等,最终生成一组排名靠前的栖息位置。

4.1.2 栖息仿生轨迹与方法

上海大学机电一体化与自动化学院 Zhang 等^[92-93]提出了一种基于时间接触理论的仿生轨迹生成方法,研究了直线轨迹、俯仰角耦合栖息和俯仰/偏航角耦合栖息 3 种策略,结果表明飞行轨迹满足无人机在物体上栖息的要求。南洋理工大学机械与航空航天工程学院 Chi^[94]将栖息过程概括为栖息前、栖息中和栖息后 3 个阶段,并提出栖息方法学,借助自行设计的抓取机构进行试验,结果表明栖息机构能对栖息目标物可靠、自

动的栖息抓取,验证了无人机栖息控制算法的正确性。

4.1.3 栖息算法设计

中国石油大学(华东)Luo 等^[9]提出了一种用于复制高度自适应鸟类栖息行为的机器学习方法,借助姿态控制器和自定位系统调节栖息机动,结果表明该方法是有用的。印度科学院航空航天工程系 Maitra 等^[95]介绍了可用于无人机自主栖息的仿生算法,描述了基于视觉的数据采集无人机导航方法,单目相机的视觉数据可用于无人机栖息的姿态控制和平面动力学建模分析。韩国科学技术院电气工程学院 Lee 等^[72]提出了一种基于强化学习的方法来进行实际应用中的倾斜式旋翼无人机栖息机动控制,通过试验证明提出的方法克服了多旋翼倾斜复杂的动力学问题,具有较强的鲁棒性。德国航空航天中心 Tomić 等^[96]提出了一种四旋翼无人机机动学习和在线推广方法,应用最优控制求解器来求解栖息机动问题,仿真和试验验证了该方法在平面点到点和栖息机动中的有效性。

4.1.4 栖息视觉导航

加州大学电气工程系 Ghadiok 等^[97]提出了利用机载单目摄像机视觉同步定位和映射算法解决无人机在室内室外栖息机动导航的问题,试验表明该无人机存在干扰的情况下自主导航并在倾斜表面自主栖息。科罗拉多州立大学机械工程系 Zhang 等^[98]提出一种视觉算法来估计栖息物体的表面斜率,搭配距离传感器和单目摄像机可同时估计 X 和 Y 方向的表面斜率,试验结果表明该算法比以往算法更优。纽约大学坦登工程学院 Mao 等^[73]提出使用视觉和惯性传感器解决无人机在倾斜表面上自主栖息的估计、规划和控制问题,通过机载传感器计算导航栖息到目标位置,最终试验结果验证了所提出方法的有效性。

4.1.5 栖息控制策略

南洋理工大学 Chi 等^[7]提出了一种四旋翼自主栖息的控制策略,通过学习鸟类栖息过程推导出自主栖息所需的函数,并在控制策略设计中完

全考虑了这些函数,最后试验表明该控制策略搭配自主设计的抓取机构能使无人机自主栖息到目标点。曼彻斯特大学 Nagendran 等^[22]将自适应钟形刚度控制器和速度匹配方案相结合,实现安全成功的栖息着陆机动,并指出该机动所需的精度和高速运行受到可用的执行器性能和硬件控制带宽的限制。斯坦福大学机械工程系 Roderick 等^[30]发现闭环平衡控制在最大化栖息所需参数的范围起着重要作用,为确定足以成功栖息的硬件设计、运动学、行为和栖息参数的范围做出指导。南京理工大学计算机科学与技术系 Liu 等^[46]发现当无人机在飞行和附着之间切换时很难控制接触力,且无人机会因与环境的异常接触而损坏,基于此提出了一种用于仿生飞行和附着机器人的阻抗控制方法,以实现与环境的平稳接触,并应用所提的阻抗控制方法调节与环境的接触力。

北京航空航天大学机械工程与自动化学院机器人研究所 Ding 等^[53-54]介绍了一种稳定控制策略,使无人机在爬壁模式下保持姿态稳定,并采用递归方法对无人机动力学进行建模,试验验证了该策略的有效性。韩国科学技术院城市机器人试验室 Myeong 等^[66]提出了一种通过低速改变姿态在垂直表面栖息的机理和控制算法,借助此控制方法可以解决无人机在栖息时因快速姿势变换和着陆速度而带来的冲击问题,降低栖息风险提高成功率。韩国科学技术院电气工程学院 Lee 等^[71]发现由于旋翼电机偏置、伺服电机减速和倾斜角受单向限制,这些情况可能会导致常规控制方法出现严重问题,针对这一问题,提出了一种控制方法—准解耦控制,该方法克服了伺服电机的慢动态特性和角度约束的局限性,取得了良好的控制效果。斯坦福大学机械工程专业 Pope 等^[77]提出了控制和规划算法,使一个带有向下抓取器的欠驱动的四旋翼栖息在倾斜的表面,同时满足驱动和传感的约束,试验结果表明所提出的控制方法可以使无人机成功地栖息在各种倾斜和垂直的玻璃表面上。

广东工业大学蒋俊高^[80]提出了一种基于四轴无人机的仿生壁面自动起降系统,通过对壁面降落过程进行分析,深入研究起降控制策略和碰

撞势能转换问题,设计了起降机构及相应的降落控制策略及算法,同时对降落发生碰撞和弹离壁面的过程分别建模进行动力学分析,最后仿真验证了该模型的可靠性和正确性。南京理工大学叶希^[99]对四旋翼无人机在近面环境下的控制技术进行研究,并提出了一种结合阻抗和非线性 PID 控制策略,试验结果证明该策略能实现无人机在飞行吸附中对位置和力良好的控制。西北工业大学航空学院孙杨等^[100]提出用“轨迹规划+跟踪控制”的方法实现四旋翼无人机垂面栖息过程,并用几何跟踪控制方法对其改进,仿真结果表明改进跟踪控制方法能很好实现垂面栖息。

4.2 固定翼无人机

4.2.1 栖息气动特性与动力学建模

韩国科学技术研究院航空航天工程系 Tahk 等^[101-102]提出了固定翼无人机高位着陆栖息的概念,建立了无人机在气动力和推力力矩作用下的平面刚体运动模型,通过将仿真结果与最优轨迹进行对比,验证了该概念的实用性。布里斯托大学 Greatwood 等^[103]使用非线性约束优化器和深度网络生成并评估在地面上执行栖息着陆的轨迹,结果表明生成的轨迹可降低空速使无人机安全着陆栖息。佛罗里达理工学院 Go 等^[104]提出了一种三维驻留概念,通过弧形轨迹引入无人机的快速减速,从而改善了二维驻留性能,结果表示可在更短的距离内实现无人机着陆栖息。南京航空航天大学自动化学院何真等^[105]对固定翼无人机栖落机动的纵向运动进行了气动特性建模与轨迹优化,优化结果表明以不同初始速度进行栖落都可以栖息到同一位置。

4.2.2 栖息机动控制

电子科技大学邹文露^[106]研究了无人机稳定栖息在垂直墙面的过程实现无人机短距离飞行后的稳定栖息,通过李雅普诺夫函数方法分析固定翼无人机栖息时的吸引域,有效估计平面与垂直表面接触时的机械稳定性。佛罗里达理工学院 Go 等^[107]提出了一种在动态失速影响下进行侧滑驻留机动的滑模控制策略,通过滑模控制策略

来解决动态失速延迟的非线性、非定常区域动态跟踪问题,最后在不同的场景下验证了该策略的可行性。约翰斯·霍普金斯大学 Moore 等^[108]开发了一种基于非线性模型预测控制和 LQR-Trees 的非线性反馈控制,通过试验成功率达 95%,即使在失速后也可实现稳定准确的栖息。

乔治华盛顿大学机械与航空航天工程系 Crandall 等^[109]提出了一种利用无人机瞬时旋转中心来检测栖落的方法,提出了基于积分加速度计获得无人机上不同点速度和利用这些点加速度大小来估计该点到瞬时旋转中心的距离 2 种方法,通过这 2 种方法来检测栖息机动何时发生。南京航空航天大学自动化学院何真等^[110]研究了固定翼无人机栖落机动轨迹跟踪控制设计与吸收域优化计算方法,仿真结果验证了栖落机动轨迹跟踪控制律的有效性,以及可以获得更大的吸引域。同时针对固定翼无人机栖落机动过程的纵向运动研究了一种在线计算量小的栖落机动鲁棒预测控制方法,仿真结果表明该控制方法具有良好的控制效果^[111]。

4.3 栖息方法特点与发展趋势

通过上述对多旋翼和固定翼无人机栖息方法进行分类型研究分析,总结出以下特点与发展趋势。

1) 多旋翼无人机栖息方法分类更加细致,技术方法相对更加成熟,围绕整个栖息过程可将栖息方法分为栖息位置选择、栖息轨迹设计、栖息算法设计、栖息视觉导航及栖息控制策略 5 个方面。未来研究中也可将栖息位置选择、栖息算法设计和栖息视觉导航等引入到固定翼无人机的栖息方法研究中,通过对无人机栖息方法更加细致、全面的分类研究,有助于提升无人机栖息的可靠性与成功率。

2) 未来可对栖息位置的选择进行更深入研究,栖息位置的优劣会直接影响无人机栖息的成功与否;其次,无人机对目标栖息物体的表面探测决定了栖息轨迹的设计及栖息机构能否抓扣或吸附到栖息物体上,之后的研究中要增强无人机对栖息物体表面的探测能力,比如利用单双目视觉传感器、超声波传感器、距离传感器等对栖

息物体表面斜率和大小以及距离进行预测计算。

3) 无人机超机动控制与栖息机构和电机倾斜角度耦合控制是无人机栖息中的难点,尤其是在倾斜表面或垂直壁面、天花板等进行栖息时会对无人机控制提出更高的要求,未来研究中可在栖息控制中引入机器学习、强化学习等算法,通过对现有的控制策略进行优化改进,实现栖息更好的控制。

5 结束语

1) 本文着重研究分析了基于不同栖息原理的栖息机构,并分析了其特点与发展趋势。同时阐述了无人机抓取与无人机机械抓扣栖息和仿生机械抓扣栖息的联系。将爬壁无人机概括为基于螺旋桨式栖息的类别,属于无人机栖息的研究领域。

2) 研究分析了变体无人机在栖息领域的应用,变体无人机主要为固定翼无人机,通过改变无人机的机翼前掠角或后掠角的角度来降低无人机栖息前的空速进而实现无人机的栖息或将机翼分为多段,并单独通过角度控制实现无人机的栖息。未来也可以进行多旋翼无人机变体机构的研究,通过旋翼电机角度变化来完成栖息或爬壁。

3) 基于不同飞行平台将无人机分为多旋翼和固定翼两大类来进行栖息方法的研究。内容主要为无人机的栖息位置选择、基于时间接触理论的仿生轨迹设计、视觉栖息导航、无人机的气动分析和动力学建模以及相应的栖落机动控制等。通过对无人机栖息方法的研究归纳分析,可为后续从事该方面的研究人员提供参考和借鉴。

参 考 文 献

- [1] 闫超,涂良辉,王聿豪,等. 无人机在我国民用领域应用综述[J]. 飞行力学,2022,40(3):1-6,12.
YAN C, TU L H, WANG Y H, et al. Application of unmanned aerial vehicle in civil field in China[J]. Flight Dynamics, 2022, 40(3): 1-6, 12 (in Chinese).
- [2] 崔敬魁. 面向电网巡线和森林火情监测的无人机路径规划算法研究[D]. 西安:西安理工大学,2017:1-4.
CUI J K. Research on UAV path planning algorithm for power line inspection and forest fire monitoring[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017: 1-4 (in Chinese).

- Chinese).
- [3] 杨扬,王连发,张宇峰. 无人机桥梁检测技术进展与瓶颈问题分析[J]. 现代交通技术,2020,17(4):27-32.
YANG Y, WANG L F, ZHANG Y F. Development and challenging issues of bridge detection technology using unmanned aerial vehicles [J]. Modern Transportation Technology, 2020, 17(4): 27-32 (in Chinese).
 - [4] 黄龙,张卫华,陈今茂,等. 爬壁机器人的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程与技术,2021(3):345-363.
HUANG L, ZHANG W H, CHEN J M, et al. A review and trend of wall-climbing robots [J]. Mechanical Engineering and Technology, 2021(3): 345-363 (in Chinese).
 - [5] CULLER E, THOMAS G, LEE C. A perching landing gear for a quadcopter[C] // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2012.
 - [6] ERBIL M A, PRIOR S D, KEANE A J. Design optimisation of a reconfigurable perching element for vertical take-off and landing unmanned aerial vehicles [J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2013, 5 (3) : 207-228.
 - [7] CHI W C, LOW K H, HOON K H, et al. Design of control strategy for autonomous perching with a quadrotor [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 461: 506-512.
 - [8] CHI W C, LOW K H, HOON K H, et al. An optimized perching mechanism for autonomous perching with a quadrotor[C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2014: 3109-3115.
 - [9] LUO C, YU L J, REN P. A vision-aided approach to perching a bioinspired unmanned aerial vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (5) : 3976-3984.
 - [10] PHANG S K, HAMID M R A, CHEN X D, et al. Autonomous ledge detection and landing with multi-rotor UAV[C] // 2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 42-47.
 - [11] LIN T J, LONG S Y, STOL K A. Automated perching of a multirotor UAV atop round timber posts[C] // 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Piscataway: IEEE Press, 2018: 486-491.
 - [12] POPEK K M, JOHANNES M S, WOLFE K C, et al. Autonomous grasping robotic aerial system for perching (AGRASP)[C] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-9.
 - [13] HANG K Y, LYU X M, SONG H R, et al. Perching and resting—A paradigm for UAV maneuvering with modularized landing gears[J]. Science Robotics, 2019, 4(28): eaau6637.
 - [14] ZHANG H J, SUN J F, ZHAO J G. Compliant bistable gripper for aerial perching and grasping[C] // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1248-1253.
 - [15] ZHANG H J, LERNER E, CHENG B, et al. Compliant bistable grippers enable passive perching for micro aerial vehicles [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(5): 2316-2326.
 - [16] YU P F, WANG Z H, WONG K C. Exploring aerial perching and grasping with dual symmetric manipulators and compliant end-effectors[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2019, 11: 175682931987741.
 - [17] KITCHEN R, BIERWOLF N, HARBERTSON S, et al. Design and evaluation of a perching hexacopter drone for energy harvesting from power lines[C] // 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1192-1198.
 - [18] MAGESH M, JAWAHAR P K. Examination of shape memory polymer-auxetic landing gears on landing approach for quadcopter[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47: 471-479.
 - [19] KOVAČ M, GERMANN J, HÜRZELER C, et al. A perching mechanism for micro aerial vehicles[J]. Journal of Micro-Nano Mechatronics, 2009, 5(3): 77-91.
 - [20] STEWART W, GUARINO L, PISKAREV Y, et al. Passive perching with energy storage for winged aerial robots [J]. Advanced Intelligent Systems, 2021: 2100150.
 - [21] BACKUS S B, ODHNER L U, DOLLAR A M. Design of hands for aerial manipulation: Actuator number and routing for grasping and perching[C] // 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway: IEEE Press, 2014: 34-40.
 - [22] NAGENDRAN A, CROWTHER W, RICHARDSON R. Biologically inspired legs for UAV perched landing [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2012, 27(2): 4-13.
 - [23] CHI W C, LOW K H, HOON K H, et al. A bio-inspired adaptive perching mechanism for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2012, 24 (4): 642-648.
 - [24] DOYLE C E, BIRD J J, ISOM T A, et al. An avian-inspired passive mechanism for quadrotor perching [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18 (2): 506-517.

- [25] XIE P, MA O. Grasping analysis of a bio-inspired UAV/MAV perching mechanism[C] // Proceedings of ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: ASME, 2013.
- [26] NADAN P M, ANTHONY T M, MICHAEL D M, et al. A bird-inspired perching landing gear system[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(6): 061002.
- [27] NADAN P M, LEE C L. Computational design of a bird-inspired perching landing gear mechanism[C] // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: ASME, 2018.
- [28] MCLAREN A, FITZGERALD Z, GAO G, et al. A passive closing, tendon driven, adaptive robot hand for ultra-fast, aerial grasping and perching[C] // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 5602-5607.
- [29] BAI L, WANG H, CHEN X H, et al. Design and experiment of a deformable bird-inspired UAV perching mechanism [J]. Journal of Bionic Engineering, 2021, 18(6): 1304-1316.
- [30] RODERICK W R T, CUTKOSKY M R, LENTINK D. Bird-inspired dynamic grasping and perching in arboreal environments [J]. Science Robotics, 2021, 6(61): eabj7562.
- [31] RODERICK W R T, CUTKOSKY M R, LENTINK D. Touchdown to take-off: At the interface of flight and surface locomotion [J]. Interface Focus, 2017, 7(1): 20160094.
- [32] 昌敏, 孙杨, 白俊强. 垂面栖息微型无人机飞行原理与技术进展[J]. 无人系统技术, 2019, 2(2): 22-31.
CHANG M, SUN Y, BAI J Q. Flight principles and research progress on vertical-perching micro aerial vehicle (MAV) [J]. Unmanned Systems Technology, 2019, 2(2): 22-31 (in Chinese).
- [33] 倪勇, 吉爱红, 肖天航, 等. 兼具扑翼飞行与爬壁能力的仿生两栖机器人研究[J]. 机电一体化, 2017, 23(2): 9-16, 46.
NI Y, JI A H, XIAO T H, et al. Study of biomimetic amphibious robot for flapping and climbing[J]. Mechatronics, 2017, 23(2): 9-16, 46 (in Chinese).
- [34] CUTKOSKY M, DESBIENS A. Bio-inspired perching and crawling air vehicles [EB/OL]. (2008-10-2) [2022-6-4]. <http://bdml.stanford.edu/twiki/pub/Rise-Private/PerchingBird/SU-perching.pdf>.
- [35] DESBIENS A L, ASBECK A T, CUTKOSKY M R. Scansorial landing and perching[M] // Robotics research. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 169-184.
- [36] DESBIENS A L, ASBECK A T, CUTKOSKY M R. Landing, perching and taking off from vertical surfaces [J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(3): 355-370.
- [37] LUSSIER D A. Landing and perching on vertical surfaces [D]. Stanford: Stanford University, 2012.
- [38] DICKSON J D, CLARK J E. Design of a multimodal climbing and gliding robotic platform [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 18(2): 494-505.
- [39] MEHANOVIC D, BASS J, COURTEAU T, et al. Autonomous thrust-assisted perching of a fixed-wing UAV on vertical surfaces[C] // Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems. Cham: Springer, 2017: 302-314.
- [40] MEHANOVIC D, RANCOURT D, DESBIENS A L. Fast and efficient aerial climbing of vertical surfaces using fixed-wing UAVs [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(1): 97-104.
- [41] POPE M T, KIMES C W, JIANG H, et al. A multimodal robot for perching and climbing on vertical outdoor surfaces [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(1): 38-48.
- [42] POPE M T, CUTKOSKY M R. Thrust-assisted perching and climbing for a bioinspired UAV [C] // Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems. Cham: Springer, 2016: 288-296.
- [43] ZHANG K, CHERMPRAYONG P, ALHINAI T M, et al. SpiderMAV: Perching and stabilizing micro aerial vehicles with bio-inspired tensile anchoring systems[C] // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 6849-6854.
- [44] NGUYEN H N, SIDDALL R, STEPHENS B, et al. A passively adaptive microspine grapple for robust, controllable perching[C] // 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics(RoboSoft). Piscataway: IEEE, 2019.
- [45] BACKUS S, IZRAELEVITZ J, QUAN J, et al. Design and testing of an ultra-light weight perching system for sloped or vertical rough surfaces on Mars [C] // 2020 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-12.
- [46] LIU Y, SUN G X, CHEN H P. Impedance control of a bio-inspired flying and adhesion robot[C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2014: 3564-3569.
- [47] WOPEREIS H W, VAN DER MOLEN T D, POST T H, et al. Mechanism for perching on smooth surfaces using aerial impacts[C] // 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue robotics (SSRR). Piscataway: IEEE Press, 2016: 154-159.
- [48] HUANG T H, ELIBOLI A, CHONG N Y. A design for UAV irregular surface landing capability[C] // Proceed-

- ings of the 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots. 2020.
- [49] LIU S S, DONG W, MA Z, et al. Adaptive aerial grasping and perching with dual elasticity combined suction cup [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4766-4773.
- [50] LIU S S, DONG W, MA Z, et al. Dual-durometer combination of vacuum cup for aerial grasping[C] // 2020 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics(RCAR). Piscataway:IEEE Press, 2020:8-13.
- [51] TSUKAGOSHI H, OSADA Y. Soft hybrid suction cup capable of sticking to various objects and environments [J]. Actuators, 2021, 10(3):50.
- [52] MAHMOOD S K, BAKHY S H, TAWFIK M A. Propeller-type wall-climbing robots: A review [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, 1094(1): 012106.
- [53] DING X, YU Y, ZHU J J. Trajectory linearization tracking control for dynamics of a multi-propeller and multi-function aerial robot-MMAR[C] // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway:IEEE Press, 2011:757-762.
- [54] DING X L, YU Y S. Motion planning and stabilization control of a multipropeller multifunction aerial robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(2):645-656.
- [55] SHIN J U, KIM D, KIM J H, et al. Micro aerial vehicle type wall-climbing robot mechanism [C] // 2013 IEEE RO-MAN. Piscataway:IEEE Press, 2013: 722-725.
- [56] MYEONG W C, JUNG K Y, JUNG S W, et al. Drone-type wall-climbing robot platform for structural health monitoring [C] // 6th AESE/11th ANCRiSST Joint Conference. 2015.
- [57] MYEONG W C, JUNG K Y, JUNG S W, et al. Development of a drone-type wall-sticking and climbing robot [C] // 2015 12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Piscataway: IEEE Press, 2015: 386-389.
- [58] YAMADA M, NAKAO M, HADA Y, et al. Development and field test of novel two-wheeled UAV for bridge inspections[C] // 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1014-1021.
- [59] IWAMOTO T, ENAKA T, TADA K. Development of testing machine for tunnel inspection using multi-rotor UAV [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 842:012068.
- [60] JUNG S, SHIN J U, MYEONG W, et al. Mechanism and system design of MAV(Micro Aerial Vehicle)-type wall-climbing robot for inspection of wind blades and non-flat surfaces [C] // 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Piscataway: IEEE Press, 2015:1757-1761.
- [61] TANAKA K, ZHANG D, INOUE S, et al. A design of a small mobile robot with a hybrid locomotion mechanism of wheels and multi-rotors [C] // 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Piscataway:IEEE, 2017.
- [62] MYEONG W, SONG S, MYUNG H. Development of a wall-climbing drone with a rotary arm for climbing various-shaped surfaces [C] // 2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). Piscataway: IEEE Press, 2018:687-692.
- [63] WATANABE K, NAKATSUKA T, NAGAI I. Production of a wall-climbing-type quadrotor and its experiment for verifying basic operations[C] // 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Piscataway:IEEE Press, 2018:1850-1855.
- [64] ANDRIKOPOULOS G, NIKOLAKOPOULOS G. Vortex actuation via electric ducted fans: An experimental study[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 95(3):955-973.
- [65] YASUNAGA M, LEE J H, OKAMOTO S. Prototype design and experimental test of a rotorcraft capable of adhering to and moving on the ceiling[C] // MATEC Web of Conferences. Paris:EDP Sciences, 2016.
- [66] MYEONG W, MYUNG H. Development of a wall-climbing drone capable of vertical soft landing using a tilt-rotor mechanism[J]. IEEE Access, 2018, 7:4868-4879.
- [67] JIANG S, ZHANG J. Real-time crack assessment using deep neural networks with wall-climbing unmanned aerial system[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(6):549-564.
- [68] MAHMOOD S K, BAKHY S H, TAWFIK M A. Novel wall-climbing robot capable of transitioning and perching [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020.
- [69] DAVID N B, ZARROUK D. Design and analysis of FCSTAR, a hybrid flying and climbing sprawl tuned robot [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(4):6188-6195.
- [70] KOMURA H, WATANABE K, NAGAI I. Production of a small-sized tandem rotor aircraft with two tiltable coaxial rotors and its experiments[C] // 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Piscataway:IEEE Press, 2021: 687-691.
- [71] LEE H, YU B, TIRTAWARDHANA C, et al. CAROS-Q: Climbing aerial robot system adopting rotor offset

- with a quasi-decoupling controller [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(4): 8490-8497.
- [72] LEE H, JEONG M, KIM C, et al. Low-level pose control of tilting multirotor for wall perching tasks using reinforcement learning [C] // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [73] MAO J, LI G, NOGAR S, et al. Aggressive visual perching with quadrotors on inclined surfaces [C] // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 5242-5248.
- [74] ANDERSON M. The sticky-pad plane and other innovative concepts for perching UAVS [C] // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston: AIAA, 2009.
- [75] DALER L, KLAPTOCZ A, BRIOD A, et al. A perching mechanism for flying robots using a fibre-based adhesive [C] // 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2013: 4433-4438.
- [76] JIANG H, POPE M T, HAWKES E W, et al. Modeling the dynamics of perching with opposed-grip mechanisms [C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2014: 3102-3108.
- [77] THOMAS J, POPE M, LOIANNO G, et al. Aggressive flight with quadrotors for perching on inclined surfaces [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2016, 8(5): 051007.
- [78] KALANTARI A, MAHAJAN K, RUFFATTO D, et al. Autonomous perching and take-off on vertical walls for a quadrotor micro air vehicle [C] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2015: 4669-4674.
- [79] GUO Y, ZHANG J, JU Y, et al. Climbing reconnaissance drone design [C] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, 452: 042060.
- [80] 蒋俊高. 面向无人机的仿生壁面自动起降系统的设计 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020: 13-40.
- JIANG J G. Design of bioic wall surface automatic take-off and landing system for UAV [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020: 13-40 (in Chinese).
- [81] PARK S, DREW D S, FOLLMER S, et al. Lightweight high voltage generator for untethered electroadhesive perching of micro air vehicles [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4485-4492.
- [82] GRAULE M A, CHIRARATTANANON P, FULLER S B, et al. Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion [J]. Science, 2016, 352(6288): 978-982.
- [83] REICH G, WOJNAR O, ALBERTANI R. Aerodynamic performance of a notional perching MAV design [C] // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston: AIAA, 2009: 63.
- [84] MANCHESTER Z R, LIPTON J I, WOOD R J, et al. A variable forward-sweep wing design for enhanced perching in micro aerial vehicles [C] // 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston: AIAA, 2017: 0011.
- [85] GREATWOOD C, WALDOCK A, RICHARDSON T. Perched landing manoeuvres with a variable sweep wing UAV [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 510-520.
- [86] 袁亮, 何真, 王月. 变体无人机栖落机动建模与轨迹优化 [J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(2): 266-275.
- YUAN L, HE Z, WANG Y. Modeling and trajectory optimization of perching maneuvers for morphing UAV [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(2): 266-275 (in Chinese).
- [87] HURST A, WICKENHEISER A, GARCIA E. Localization and perching maneuver tracking for a morphing UAV [C] // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008. Piscataway: IEEE Press, 2008.
- [88] WICKENHEISER A, GARCIA E. Perching aerodynamics and trajectory optimization [C] // Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2007. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2007, 6525: 191-199.
- [89] 何真, 陆宇平, 郑曼曼. 变体无人机栖息机动的仿真与分析 [C] // 第三十三届中国控制会议论文集 (E 卷). 上海: 上海系统科学出版社, 2014: 109-114.
- HE Z, LU Y P, ZHENG M M. Simulation and analysis of perching maneuvers for morphing UAVS [C] // Proceedings of the 33rd China Control Conference (Volume E). Shanghai: Shanghai Systems Science Press, 2014: 109-114.
- [90] 岳理, 何真, 王无天. 变体辅助的无人机栖落机动模糊控制设计 [J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(6): 871-880.
- YUE C, HE Z, WANG W T. Fuzzy control design for perching maneuvers of morphing UAVs [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(6): 871-880 (in Chinese).
- [91] WANG P F, ZHANG Y F, QIN H L, et al. Offline perching location selection for quadrotor UAV in urban environment [C] // 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). Piscataway: IEEE

- Press, 2016.
- [92] ZHANG Z, XIE P, MA O. Bio-inspired trajectory generation for UAV perching movement based on tau theory [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, 11(9): 141.
- [93] ZHANG Z, XIE P, MA O. Bio-inspired trajectory generation for UAV perching[C] // 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway: IEEE Press, 2013: 997-1002.
- [94] CHI W. A bio-inspired methodology of automatic perching for unmanned aerial vehicles[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2016: 23-41.
- [95] MAITRA A, PRASATH S R, PADHI R. A brief survey on bio-inspired algorithms for autonomous landing [J]. *IFAC-Papers Online*, 2016, 49(1): 407-412.
- [96] TOMIĆ T, MAIER M, HADDADIN S. Learning quadrotor maneuvers from optimal control and generalizing in real-time[C] // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1747-1754.
- [97] GHADIOK V, GOLDIN J, REN W. On the design and development of attitude stabilization, vision-based navigation, and aerial gripping for a low-cost quadrotor[J]. *Autonomous Robots*, 2012, 33(1): 41-68.
- [98] ZHANG H, ZHAO J. Vision based surface slope estimation for unmanned aerial vehicle perching[C] // *Dynamic Systems and Control Conference in 2018*. New York: ASME, 2018.
- [99] 叶希. 近面环境下四旋翼无人机的控制技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 29-37.
- YE X. Research on control technology of quadrotor UAV in near-surface environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019: 29-37 (in Chinese).
- [100] 孙杨, 昌敏, 白俊强. 微小型四旋翼无人机垂面栖停轨迹规划与控制[J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 325756.
- SUN Y, CHANG M, BAI J Q. Trajectory planning and control for micro-quadrotor perching on vertical surface [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 325756 (in Chinese).
- [101] TAHK M J, HAN S, LEE B Y, et al. Perch landing assisted by thruster (PLAT): Concept and trajectory optimization [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2016, 17(3): 378-390.
- [102] TAHK M J, HAN S, LEE B Y, et al. Trajectory optimization and control algorithm of longitudinal perch landing assisted by thruster[C] // 2016 European Control Conference (ECC). Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [103] WALDOCK A, GREATWOOD C, SALAMA F, et al. Learning to perform a perched landing on the ground using deep reinforcement learning[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2018, 92(3-4): 685-704.
- [104] ALIKHAN M, PEYADA N K, GO T H. Flight dynamics and optimization of three-dimensional perching maneuver[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013, 36(6): 1791-1797.
- [105] 李达, 何真, 阙莹莹. 无人机栖落机动建模与轨迹优化[J]. *飞行力学*, 2017, 35(4): 47-51.
- LI D, HE Z, KAN Y Y. Modeling and trajectory optimization of perching maneuvers for UAV [J]. *Flight Dynamics*, 2017, 35(4): 47-51 (in Chinese).
- [106] 邹文露. 无人机栖息动态特性分析与同步控制[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 36-49.
- ZOU W L. Dynamic characteristics analysis and synchronous control of unmanned aerial vehicle [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 36-49 (in Chinese).
- [107] FEROSKHAN M, GO T H. Control strategy of sideslip perching maneuver under dynamic stall influence [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 72: 150-163.
- [108] MOORE J, CORY R, TEDRAKE R. Robust post-stall perching with a simple fixed-wing glider using LQR-Trees [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(2): 025013.
- [109] CRANDALL K L, MINOR M A. UAV fall detection from a dynamic perch using Instantaneous Centers of Rotation and inertial sensing[C] // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2015: 4675-4679.
- [110] 王无天, 何真, 岳理. 飞行器栖落机动的轨迹跟踪控制及吸引域优化计算[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(2): 414-423.
- WANG W T, HEN Z, YUE C. Trajectory tracking control and optimal computation of attraction domain for aircraft in perching maneuvers[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 40(11): 414-423 (in Chinese).
- [111] 万慧雯, 何真, 曹瑞, 等. 无人机栖落机动的一种离线鲁棒预测控制算法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(6): 785-794.
- WAN H W, HE Z, CAO R. An off-line robust predictive control algorithm for UAV in perching maneuver [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(6): 785-794 (in Chinese).

(责任编辑: 范真真)

A review of perching technology of micro-UAV

ZHANG Liangyang, LI Zhanke*, HAN Haiyang

School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: Research on the perching design of micro-UAV plays an important role in improving the endurance performance of micro-UAV, enhancing the environmental adaptability of micro-UAV and improving the long-term detection and monitoring capability of micro-UAV. With the increasing requirements for the endurance performance of micro-UAV and the adaptability of complex environment, researchers all over the world begin to study the perching technology of micro-UAV, and have made remarkable achievements in the research on micro-UAV's principle of perching, mechanism design, method of perching, etc. This article summarizes the principle of perching, mechanism of perching and method of perching of micro-UAV in the literature in recent years, and analyzes the characteristics and development trend of the mechanism of perching. At the same time, the research on morphing UAV in the field of perching is discussed, and the relationship between UAV wall climbing and grasping and UAV perching is also expounded. In addition, UAV is divided into two categories of multi-rotor and fixed-wing for the research and analysis of perching methods, including UAV perching position selection, bionic trajectory design based on time contact theory, visual perching navigation, aerodynamic analysis and dynamic modeling of UAV and corresponding perching maneuver control. Through the research and inductive analysis of UAV perching design technology, it can provide reference for subsequent researchers engaged in this field.

Keywords: micro-UAV; principle of perching; mechanism of perching; method of perching; morphing UAV; grasping; wall climbing

Received: 2022-06-04; **Revised:** 2022-06-27; **Accepted:** 2022-07-29; **Published online:** 2022-08-03 14:25

URL: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2023/V44/I12/27573>

Foundation item: Key Research and Development Projects of Shaanxi Province(2021ZDLGY09-06)

* **Corresponding author.** E-mail: lzk@nwpu.edu.cn