

文章编号:1674-8190(2022)05-001-13

垂直起降固定翼无人机技术发展及趋势分析

王科雷,周洲,马悦文,杜万闪,郭佳豪,李旭,张阳,孙蓬勃

(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要: 垂直起降固定翼无人机具有对起降场地要求低、机动性好、巡航速度高、航时长等优势,是目前航空领域研究热点。本文阐述了国内外现有垂直起降固定翼无人机研究现状和基本特征,详细分析了不同类型垂直起降固定翼无人机的技术特点,提出更高的飞行速度、更长的续航时间、更强的任务载荷能力将是未来垂直起降固定翼无人机技术的主要发展方向和必然趋势。尽管倾转旋翼式和尾座式仍是当今垂直起降固定翼无人机主流构型,但基于分布式电推进的高速垂直起降固定翼无人机技术将成为未来航空领域新热点,给出进一步加强垂直起降固定翼无人机新构型、新原理的探索性研究的建议。

关键词: 垂直起降固定翼无人机;发展现状;倾转旋翼式;尾座式;分布式电推进

中图分类号: V279; V275+.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.01

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development and Trend Analysis of Vertical Takeoff and Landing Fixed Wing UAV

WANG Kelei, ZHOU Zhou, MA Yuewen, DU Wanshan, GUO Jiahao,

LI Xu, ZHANG Yang, SUN Pengbo

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

Abstract: The vertical takeoff and landing (VTOL) fixed wing unmanned aerial vehicle (UAV) has many advantages, such as low requirements for takeoff and landing site, good maneuverability, high cruise speed and long endurance, etc., which is a hot topic in the aviation field. The existing VTOL fixed wing UAV development status and their basic features around the world are described in this paper, and then the technical features faced by these different types of VTOL fixed wing UAV are analyzed. It indicates that the VTOL fixed wing UAV with higher cruise speed, longer battery life, and stronger ability of task load seems to be the main developing direction and inevitable trend in the future. Although the tilting rotor configuration and tail-seat configuration are still the mainstream configuration of the VTOL fixed wing UAV in nowadays, the distributed electric propulsion (DEP) VTOL fixed wing UAV technology will become the hottest issues in the field of aerospace, therefore, it is necessary to enhance the evolutionary research in the new-concept configurations and new principles of the high-performance VTOL fixed wing UAV.

Key words: VTOL fixed wing UAV; development status; tilting rotor configuration; tail-seat configuration; distributed electric propulsion

收稿日期:2021-09-03; 修回日期:2021-11-03

基金项目:国防基金(2021-JCJQ-JJ-0805); 科工局重点实验室基金(D5150220016); 陕西省重点研发计划(2021ZDLGY09-08)

通信作者:王科雷, craig-wang@nwpu.edu.cn

引用格式:王科雷,周洲,马悦文,等. 垂直起降固定翼无人机技术发展及趋势分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 1-13.

WANG Kelei, ZHOU Zhou, MA Yuewen, et al. Development and trend analysis of vertical takeoff and landing fixed wing UAV[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 1-13. (in Chinese)

0 引言

垂直起降固定翼飞行器能够以直升机方式垂直起降,并能以固定翼方式巡航前飞。与传统直升机相比较,垂直起降固定翼飞行器具有前飞速度快、航程远、航时长等显著优势,而与常规固定翼飞行器相比较,垂直起降固定翼飞行器能够定点起降和悬停,对机场跑道没有依赖,任务能力显著增强。以上优点促使该类飞行器成为当今世界研究的热门领域^[1]。从 2004 年起,美国已经针对垂直起降固定翼飞行器技术布置并开展了系列研究和验证,包括联合多任务旋翼机(JMR)技术验证项目^[2-3]、未来垂直起降飞行器(FVL)项目^[4-8]、垂直起降试验飞机(VXP)项目^[9]、战术侦察节点(TERN)项目^[10-12]、海军陆战队空地特遣部队远征无人机系统(MUX)项目^[13-15]等,而在上述项目的带动下,美国垂直起降固定翼飞行器技术实力得到了显著提升,同时也积累了大量工程经验,对未来高效垂直起降固定翼飞行器装备发展提供了有力支撑。

近年来,随着无人机在军事、民用领域的用途越来越广泛,对无人机起降方式的要求也越来越多样化,因此,将垂直起降技术应用到无人机上已经成为必然。由于无人机无需考虑飞行员的生命保障、生理极限等问题,将垂直起降技术应用于无人机领域将更为灵活,且更容易实现。

本文首先阐述国内外垂直起降固定翼无人机研究进展,然后分析不同种类垂直起降固定翼无人机方案技术特点,最后讨论垂直起降固定翼无人机技术的发展趋势。

1 垂直起降固定翼无人机技术研究进展

与有人机相比,无人机系统组成更为简单,更适合垂直起降技术应用和发展,按照总体构型及动力形式的不同,可以将目前主流垂直起降固定翼无人机划分为升推复合式、尾座式、倾转动力式 3 种构型形式。

1.1 升推复合式垂直起降固定翼无人机

升推复合式垂直起降固定翼无人机大多直接

在固定翼的基础上加装多旋翼或升力螺旋桨,在垂直起降阶段由多旋翼或螺旋桨系统提供升力,在平飞阶段则切换回固定翼模式。Rheinmetall Airborne Systems 公司与 Swiss UAV 公司于 2016 年联合研制的 TU-150 战术多用途无人机^[16]应用“双复合”设计,如图 1 所示,即旋翼—固定翼复合和混合动力:两侧翼尖各装配一副三叶旋翼来提供垂直升力,使其在旋翼模式下具有直升飞行能力;而在固定翼模式下,将旋翼停止,靠机翼升力平衡重力,由机身末端电机驱动的推进螺旋桨提供前进推力。TU-150 垂直起降固定翼无人机的设计目标是“具有低保障要求的高性能系统”,其最大起飞质量约为 140 kg,最大任务载荷质量约为 25 kg,可配装多种传感器,能够执行多种任务,最大飞行速度约 222 km/h,续航时间约 8 h。其他如 Songbird 无人机^[17],CW 大鹏系列无人机^[18]等也是采用类似方案。



图 1 TU-150 战术多用途无人机^[16]
Fig. 1 TU-150 tactical multi-role UAV^[16]

为了进一步提高垂直起降固定翼无人机效率,设计人员提出了一种“在巡航时将旋翼停转并锁定,进而转变成机翼或其他翼面以提供气动力”^[19-21]的旋转机翼创新思路,进而形成一种特殊的升推复合式垂直起降构型。美国波音公司鬼怪工厂于 2003 年研制的 X-50A“蜻蜓”概念验证机^[22]即采用“旋转机翼+鸭翼+尾翼”布局形式,如图 2 所示,其垂直起降和悬停时的飞行模式与直升机相似,但其旋翼旋转运动是依靠“桨尖喷气驱动”技术实现,而抗自旋扭矩则是通过“无尾桨”系统实现。当无人机进入固定翼模式,旋翼停变为主机翼以提供巡航升力^[23],相类似地如西北工业大学于 2006 年提出的“灵龙”无人机^[24-25],如图 3 所示,其与 X-50A“蜻蜓”概念验证机主要区别在于机身尾部加装反扭矩尾桨,并且固定翼飞行状态

采用机头拉进螺旋桨而非喷气推进装置。



图2 X-50A“蜻蜓”概念验证机^[22]
Fig. 2 X-50A "Dragonfly" proof-of-concept^[22]



图3 “灵龙”无人机概念图^[24]
Fig. 3 "Linglong" UAV concept^[24]

1.2 尾座式垂直起降固定翼无人机

尾座式垂直起降固定翼无人机是将动力系统固连在机体上,并随全机整体偏转的一种特殊布局无人机。该类型无人机将起落架安装在尾部,起飞时,全机纵轴垂直地面从而“坐地”起飞;当满足一定的高度和速度条件后低头过渡进入固定翼巡航模式;降落前需全机抬头恢复“坐地”姿势后垂直降落。

目前该类型无人机代表机型包括 Aerovel 公司于2012年研制的弹性旋翼尾座式无人机(如图4所示)、美国诺格公司2015年提出且目前正在研制的 TERN“燕鸥”尾座式无人机(如图5所示)以及国内航空工业成都飞机工业有限责任公司2016年于第十四届中国西部国际博览会展出的 VD-200 尾座式无人机(如图6所示)等。其中 TERN“燕鸥”尾座式无人机采用飞翼布局,前置大型对转螺旋桨,而根据 DARPA 的设想,TERN“燕鸥”尾座式无人机可以于5级海况下在驱逐舰或更小的舰船上垂直起降。



图4 弹性旋翼尾座式无人机^[26]
Fig. 4 Tail seat UAV with elastic rotor^[26]



图5 TERN尾座式无人机概念图^[27-28]
Fig. 5 TERN tail seat UAV concept^[27-28]



图6 VD-200尾座式无人机^[29]
Fig. 6 VD-200 tail seat UAV^[29]

1.3 倾转动力式垂直起降固定翼无人机

倾转动力式垂直起降固定翼无人机是指无人机在垂直起降和平飞过程中按需求对动力部件进行向上或向前的倾转。传统倾转动力式垂直起降固定翼无人机主要包括倾转旋翼和倾转涵道两种形式,是目前国内外各军种垂直起降固定翼飞行器的主流构型。但随着近年来分布式电推进技术、分布式动力的发展,倾转分布式动力的垂直起降形式逐渐兴起,已成为国内外研发重点。

(1) 倾转旋翼式

倾转旋翼式垂直起降固定翼无人机技术发展较早,其最具代表的机型是美国 V-22 舰载无人机“鹰眼”^[30-31],如图7所示。“鹰眼”无人机与 V-22 无

人机的总体布局十分相像,都采用中单翼布局,双垂尾内倾,两副旋翼由机身内部的一台发动机驱动,推力转向则是通过翼尖旋翼的倾转来实现。



图7 “鹰眼”倾转旋翼式无人机^[30-31]
Fig. 7 "Hawk-eye" tilt-rotor UAV^[30-31]

在继承V-22、“鹰眼”成熟技术的基础上,美国贝尔公司于2019年又提出了V-247“警惕”倾转旋翼无人机方案(如图8所示),其采用的呈纺锤体的机体外形使全机趋于流线型,且将发动机固定安装于机身内,缩小了旋翼短舱截面,有效提高了全机阻力特性^[32]。同时为进一步提高全机续航性能,V-247“警惕”无人机在旋翼短舱外侧特别增加了一段机翼设计,有效提高了机翼展弦比和升阻比。



图8 V-247“警惕”倾转旋翼式无人机概念图^[32]
Fig. 8 V-247 "Alert" tilt-rotor UAV concept^[32]

此外,采用倾转旋翼式方案的还有以色列2012年研制的“黑豹”^[33]和韩国2017年研制的TR-60^[34]垂直起降固定翼无人机,如图9~图10所示。



图9 “黑豹”倾转旋翼式无人机^[33]
Fig. 9 "Panther" tilt-rotor UAV^[33]



图10 TR-60倾转旋翼式无人机^[34]
Fig. 10 TR-60 tilt-rotor UAV^[34]

(2) 倾转涵道式

倾转涵道式垂直起降固定翼无人机的垂直起降方式与倾转旋翼式相同,不同之处是将旋翼换成了涵道,这种几何特征上的改进使得动力部件可以更好地融入机身/机翼中。Project Zero倾转涵道风扇验证机于2010年开始研制,采用飞翼布局,如图11所示,包括可拆卸机翼和中央翼,其中中央翼面积很大,于两侧各开有一个圆环以安装内埋式涵道风扇,并通过安装罩上装有的转轴按任务需求绕机身横轴进行倾转。



图11 Project Zero倾转涵道式无人机^[35]
Fig. 11 Project Zero tilt-duct UAV^[35]

美国波音公司鬼怪工厂于2016提出的“幽灵雨燕”倾转涵道式无人机,如图12所示,由四个涵道风扇共同提供动力,垂起状态下由机身内埋涵道提供主要升力,翼梢涵道向上倾转提供辅助升力,前飞状态下机身风扇及其盖板关闭,翼梢涵道向前倾转提供前飞动力。



图12 “幽灵雨燕”倾转涵道式无人机概念图^[36-37]
Fig. 12 "Ghost Swift" tilt-duct UAV concept^[36-37]

(3) 倾转分布式动力结构

倾转分布式动力结构垂直起降固定翼无人机与倾转旋翼、倾转涵道的最大区别在于其分布式动力部件与机翼的融合度或一体化程度相对更高,且需要利用位于机身内部的倾转机构操纵机翼/动力融合体的旋转运动来实现推力转向。其外形特征与倾转机翼式垂直起降飞行器相类似,但本质上仍是倾转动力的一种特殊体现。NASA兰利中心于2015年推出了GL-10闪电无人机,如图13所示。采用分布式螺旋桨—固定翼常规布局形式,利用机翼上8个螺旋桨和平尾上2个螺旋桨共同驱动实现垂直起降和前飞,目前已经经过多次验证飞行,证明了分布式电推进技术应用于垂直起降飞机具有十分明显的优势,借助于分布式螺旋桨与机翼的一体化设计,全机功重比有效提升,同时电机在整个转速范围内都有较高的效率,且全机巡航阶段飞行的可靠性明显提升。理论上GL-10无人机综合效率能够达到常规直升机的4倍,但其不足之处在于全电驱动下飞行航时相对较短,预计后期采用油电混合动力后此问题可以得到改善。



图13 GL-10“闪电”分布式动力倾转机翼验证机^[38]

Fig. 13 GL-10 "Lightning" distributed dynamic tilting wing verifier^[38]

美国极光飞行科学公司针对VXP项目联合罗罗公司和霍尼韦尔公司于2016年推出的XV-24“雷击”无人机,如图14所示,致力于将垂直起降飞行器的飞行速度在现有基础上提升50%。“雷击”无人机采用鸭翼布局的倾转分布式动力/机翼融合体设计,由1台罗罗公司的AE1107C涡轴发动机驱动,通过3台霍尼韦尔公司的发电机产生电力,进而驱动全机共计24个变距涵道风扇(机翼18个、鸭翼6个),2017年4月,项目团队完成了1:5缩比验证机试飞,验证了分布式电推进系统、倾转分

布式动力等设计的可行性。尽管该项目由于在研发高性能1兆瓦级发电机热管理方面遇到技术瓶颈、没有找到合适军方合作伙伴等原因被取消,但XV-24“雷击”无人机所采用的分布式混合电驱动变距涵道风扇、创新的同步电驱动系统、用于垂直起降的可倾转的分布式动力/机翼融合体,具有高效的悬停/平飞双模式适应性等特点,让其被誉为最具革命性的新型未来垂直起降飞机。



图14 XV-24“雷击”分布式动力倾转机翼验证机^[39-40]

Fig. 14 XV-24 "Lightning-strike" distributed dynamic tilting wing validator^[39-40]

2 垂直起降固定翼无人机技术特点

2.1 升推复合式垂直起降固定翼无人机

升推复合式垂直起降固定翼无人机是在垂直起降和巡航阶段各自采用相互独立的动力系统,如旋翼系统和推进螺旋桨系统,技术成熟度高,实现性较好。同时各动力系统只在特定阶段使用,不用兼顾其他工作状态,因此各动力单元均为单点工况设计,能够做到垂直起降阶段和巡航阶段的动力特性最优,是目前最为常见的垂直起降固定翼无人机布局形式。

然而,在升推复合式垂直起降固定翼无人机进行垂直起降或巡航平飞时,其垂直、水平两套升力/推力装置之一需要停止工作,完全成为废重,致使全机质量效率较低。同时,在过渡阶段垂直起降动力依旧存在,因此动力尾流会对机翼、平尾等部件产生气动干扰,影响操纵和控制。

对于采用旋转机翼的升推复合式垂直起降固定翼无人机而言,尽管将旋翼与机翼进行了结合,并从根本上避免了旋翼前飞时左右气流不对称导致的飞行速度限制。但由于需要同时满足旋翼和固定翼要求,旋转机翼需要采用前后对称的椭圆翼型,而椭圆翼型的钝后缘特征会使其在较小角

度下产生流动分离,同时,旋转机翼通常需要采用小展弦比的无扭转梯形翼,与传统机翼的气动和结构特性存在一定差异^[41]。此外,由于旋转机翼不具备常规机翼一般优异的升力特性,因此需要采用较大尺寸的平尾和鸭翼来共同产生升力,这使得在悬停、过渡、前飞阶段,旋转机翼的尾流与机身、平尾、鸭翼等产生较为复杂的气动干扰,对飞行器的动力学特性及控制产生不利影响^[42-43]。

2.2 尾座式垂直起降固定翼无人机

尾座式垂直起降固定翼无人机采用无人机整体转动的模态转换方式,相比倾转动力/机翼类的垂直起降方案不需要额外的运动偏转机构,因此设计制作相对简单直接,使用十分灵活。但其在垂直起降时重心偏高,容易受侧风和地形的影响,有倾覆的风险。此外,尾座式垂直起降方案从垂直起降模式转化为平飞过程中,飞机姿态角变化大,对动力要求很高。在垂直起降和过渡过程中,尾座式无人机的操稳特性较差,应对突风能力不强,因此保证其在状态转换过程中需要的倾转力矩是主要难点^[44-46]。

2.3 倾转动力式垂直起降固定翼无人机

(1) 倾转旋翼式

倾转旋翼式垂直起降固定翼无人机^[47]相当于将直升无人机和固定翼无人机合二为一。然而,由于倾转旋翼既要作为垂直起降时的直升旋翼使用,又要作为固定翼拉力/推进螺旋桨使用,而垂直起降和巡航两种模态工作环境差异显著,带来了旋翼系统兼顾垂直起降、过渡、前飞多模态综合效能的多点设计问题^[48]。

倾转旋翼无人机还面临着严重的旋翼/机翼气动干扰问题^[49]。在悬停状态,旋翼下洗流冲击机翼表面,使机翼受到较大的垂直方向载荷,随后的气流反弹会使旋翼效率下降,影响旋翼的悬停性能和飞机的稳定性能^[50];在前飞状态,旋翼尾流仍然可以诱使机翼产生周期性气动力,容易造成旋翼与机翼耦合的气弹稳定性问题以及旋翼回转的颤振^[51],对飞行安全产生影响;而在垂直起降距离地面较近时,机翼会对旋翼下洗流产生阻塞影响,可能会造成旋翼气流出现“喷泉”效应^[52],也可

能会造成倾转旋翼无人机在垂直下降时进入涡环状态^[53]。

倾转旋翼无人机也面临着较大的过渡阶段飞行控制难题^[54],这是由于倾转旋翼无人机过渡模态转换速度范围相对较窄,且动力倾角、飞机速度、飞机迎角等参数不断改变,使得全机气动特性及稳定性随时间呈非线性变化,进而导致控制难度大幅增加。

由于可倾转旋翼和发动机短舱一般是在机翼外端或翼尖安装,因此对倾转传动机构和机翼结构带来了很大的设计压力。尤其是倾转旋翼无人机传动系统除了具备常规直升机传动系统功能外,还需带动两侧翼尖旋翼实现倾转运动,同时传动系统还需要将两侧发动机的动力通过固定端的减速器和倾转旋翼减速器按要求传递给旋翼系统,并在单发失效的情况下具备实现两侧动力互连的功能。因此,高效、高可靠的倾转/传动机构和结构系统是倾转旋翼无人机技术实现的关键^[55-56]。

(2) 倾转涵道式

倾转涵道式垂直起降固定翼无人机的技术特点与倾转旋翼相类似,但由于涵道动力与机体融合度更高,可以设置在机身或机翼上从而提供直接的升力,在设计上更加灵活。此外,涵道壁面相对旋转叶片物理隔离,一方面可以起到防护作用,另一方面也可以屏蔽和降低桨叶气动噪声,最终使得该类型飞行器飞行过程更加安全和安静,增强其实用性。

然而,倾转涵道式垂直起降固定翼无人机的动力/气动特性分析始终较为困难,这是由于无人机多模态飞行导致的涵道风扇工作环境异常复杂,而且国内外缺少相关的在低速大攻角状态下涵道风扇的理论分析^[57],因此其特性多数是从风洞试验中获得。此外,当倾转涵道的直径达到一定程度后,其在前飞状态下产生的阻力会严重影响飞行器整体性能,这极大地限制了倾转涵道式垂直起降固定翼无人机规模^[58]。

(3) 倾转分布式动力结构

倾转分布式动力结构垂直起降固定翼无人机最大特点在于采用分布式混合动力电驱动系统,减少其他传动机械在飞机内部的空间占比,有效

降低结构重量和复杂度。通过分布式动力与机翼相耦合的形式,在同等升力需求的情况下可以有效减小机翼弦长,提高悬停状态的操纵性和抗风稳定性。此外,电驱动形式带来更快的响应速度和更精细化的操纵性能,如XV-24“雷击”无人机每一个涵道风扇都采用恒定转速设计,通过调节总距可以控制各个风扇拉力,同时每个风扇所处涵道的上、下机翼面都可以独立控制,实时优化涵道/机翼耦合气动效率和在垂直平面内提供的矢量推力^[59],这种控制形式具有更高的冗余度和可靠性。

然而,由于倾转分布式动力结构垂直起降固定翼无人机都采用分布式动力/机翼融合体整体倾转的形式,其传力和受力情况较为复杂,对全机结构和传动机构的强度和刚度要求更高。提出每一个动力部件均可以独立控制是分布式电推进飞行器的发展愿景,这要求系统模型和控制律等具有处理极复杂问题的能力,基于当前飞行控制技术还无法实现。

此外,由于采用混合动力电驱动设计,能量从发动机输出到所需动力会产生约三成的损失^[60],严重降低无人机的续航能力,同时,目前的电动机功率密度较低导致其重量较大,造成全机重量中动力重量占比较高,不利于全机重量分配。

3 垂直起降固定翼无人机技术发展趋势

由国内外垂直起降固定翼无人机技术方案发展现状可以看出,更高的飞行速度、更长的续航时间、更强的任务载荷能力将是未来垂直起降固定翼无人机技术的必然趋势。综合来看,倾转旋翼式和尾座式已成为当前国内外军民用垂直起降固定翼无人机的主流,在已有成果的基础上进一步追求高效悬停、高速和远程能力是近期垂直起降固定翼无人机技术研发的主要任务。此外,出于分布式电推进技术的诸多利好特性,发展基于分布式电推进的高速垂直起降固定翼无人机技术或将成为未来航空领域新热点,而随着分布式电推进技术在飞行器总体/动力/气动/控制等方面潜力的深入挖掘,探索垂直起降固定翼无人机新构型、新原理十分必要。综上,未来垂直起降固定翼无

人机技术发展的趋势可以主要概括为以下三个方面。

(1) 倾转旋翼式和尾座式已成为垂直起降固定翼无人机主流构型

垂直起降固定翼无人机因无需考虑飞行员的生理极限、生命保障等多种问题,其布局形式十分灵活且极具创造力,目前国内外在研的就有多种构型,其中以倾转旋翼式和尾座式最具代表性。然而,未来战场对垂直起降固定翼无人机快速响应能力、快速到达能力要求必然极高,而现有倾转旋翼式和尾座式垂直起降固定翼无人机技术尚无法满足应用需求,因此需要在已有成果的基础上进一步追求高效悬停、高速和远程能力,主要在先进旋翼系统设计、旋翼/机翼气动干扰、高可靠倾转传动系统技术、系统建模技术、飞行控制技术等方面进行突破创新。

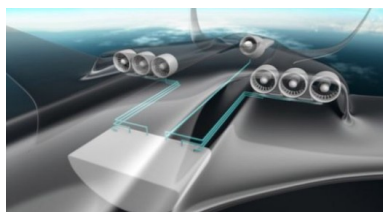
(2) 基于分布式电推进的高速垂直起降固定翼无人机技术或将成为未来航空领域新热点

随着2016年VXP项目中极光公司“雷击”方案的胜出,“分布式电推进技术”已经成为近几年航空领域发展新热点。该项技术将飞行器总体、动力、气动等进行综合,充分利用了电推进动力单元高可靠、易分配、尺度无关特性^[61],省去了不必要的传动机械,简化全机设备布置,有效提高了无人机的气动特性,被认为是下一代航空器设计最具潜力的动力布局形式。

首先,与传统动力形式相比,分布式电推进系统具有增加载运量,提高升阻比以及降低油耗、尾气排放量和低噪声等优势。空客、NASA等均对分布式电推进系统在未来民用客机上的应用进行了分析研究,如图15~图18所示,研究结果表明:分布式电推进系统可以按照需求对机翼升力分布进行调整,如在巡航阶段实现椭圆形升力分布,从而使飞机具有更良好的气动效率等^[38,62-65]。其次,分布式电推进系统可以通过差量控制实现动力的矢量运转,控制模式更多样和直接。最后,分布式电推进系统与全机融合度高,采用多个小尺寸动力单元不会引起重量的增加,且单个动力在较宽的转速范围内都能保持较高效率,极大地提升了飞行器设计空间。



(a) 整机



(b) 局部

图 15 空客 E-Airbus 分布式电推进概念图^[61]Fig. 15 Airbus E-Airbus distributed electric propulsion concept^[61]图 16 NASA X-57 分布式电推进验证机^[61]Fig. 16 NASA X-57 distributed electric propulsion verifier^[61]图 17 NASA N3-X 分布式电推进概念图^[61]Fig. 17 NASA N3-X distributed electric propulsion concept^[61]

总体来说,分布式电推进技术在飞机总体、气动、动力、控制上已展示出无可比拟的潜力,前文所述如 GL-10“闪电”、XV-24“雷击”垂直起降固定翼无人机等均为分布式电推进技术发展的产物。通过分布式电推进系统与垂直起降固定翼无人机的有效结合,可以获得以下优势:提高巡航效率,增大航时、航程;减小垂直起降和巡航平飞阶段需用功率之间差异,实现动力/气动最优匹配;增强飞行控制能力,提高控制冗余度和鲁棒性。

因此,基于分布式电推进的高速垂直起降固定翼无人机技术或将成为未来航空领域的研究热点方向,尽快发展基于分布式电推进的总体/动力/气动/控制综合设计技术、高性能轻量化电机驱动技术等势在必行。

电力系统技术始终是支撑分布式电推进技术发展的重要基础,如何研究出可靠性更高、效率更高、质量更轻的分布式电推进系统是使得该类飞机真正走上实用的关键。分布式电推进飞机的分布式动力与机体耦合程度更高,气动干扰尤为显著,只有依据分布式电推进动力/气动强耦合特征开展特种布局总体设计技术研究,才可以最大程度发挥分布式电推进垂直起降的性能和优势。基于分布式电推进的高速垂直起降固定翼无人机控制系统设计也极具革新,分布式动力配置为飞行器高效控制带来了更高的设计自由度,而通过与传统气动舵面的联动也可以取得更优的控制效果,研究探索出适用于该类无人机的分布式控制系统设计方法迫在眉睫。

(3) 需加强对垂直起降固定翼无人机新构型、新原理的探索研究

无论哪种垂直起降构型方案^[66-71],只要是完全依靠发动机推力来提供上升力,就要求无人机动力推力与重量之比(推重比)至少大于1,而在固定翼飞行模式下,需用推重比一般在0.1~0.3左右,这导致两种飞行模式的需用推力(发动机需用功率)相差近5倍,由此带来垂直起降/巡航双模态发动机功率不匹配、巡航状态动力极度富余、发动机无法工作在最佳状态的根本性问题,而若要突破这一桎梏,就需要以“最小动力代价”实现垂直起降,这是传统垂直起降固定翼飞行器设计面临的挑战性问题。

自20世纪40年代以来,设计人员就已经开始探讨各种有利于垂直/短距起降的新构型和新原理,如半环形机翼—螺旋桨构型^[72-73]、外部吹气襟翼构型^[74-75]、环量控制技术^[76-77]、扇翼飞行器技术^[78-79]、前缘异步螺旋桨技术^[80-81]等,尽管现有理论方法和数值模拟技术始终无法对一些复杂构型的流动机理、气动力特性等作出较好的描述和预测,但相关研究结果表明,动力部件与机翼的高效耦合可以有效提高动力部件向大气环境内注入能量的利用率,将其应用于垂直起降潜力巨大。

因此,随着计算机技术和实验技术的快速发展,以及国内外对分布式电推进技术在飞行器总体/动力/气动/控制等方面潜力的深入挖掘,进一步加强对垂直起降固定翼无人机新构型、新原理的探索性研究,突破垂直起降完全依靠动力推力的限制很有必要。

4 结束语

垂直起降固定翼无人机具有对起降场地要求低、机动性好、巡航速度高、航时长等优势,在军用和民用领域都具有极为广泛的应用前景,是目前航空领域研究的热点话题。

目前国内外在研垂直起降固定翼无人机仍是以倾转旋翼式和尾座式为主流构型,但由于现有技术尚无法满足未来战场对垂直起降固定翼无人机快速响应能力、快速到达能力的极高要求,需要在已有成果的基础上进一步进行突破创新。而随着分布式电推进技术在飞机总体、气动、动力、控制上逐渐展示出无可比拟的潜力,基于分布式电推进的高速垂直起降固定翼无人机技术或将成为未来航空领域新热点,因此需要深入挖掘布式电推进技术在飞行器总体/动力/气动/控制等方面的优势,加强对垂直起降固定翼无人机新构型、新原理的探索性研究,为我国未来的垂直起降固定翼无人机装备发展提供技术更成熟、性能更先进、选择更多样的解决方案。

参考文献

- [1] 李耐和. 美军下一场战争需要的十项关键技术[J]. 新时代国防, 2011(12): 1-8.
LI Naihe. Ten key technologies the U. S. Military needs in the next war[J]. National Defense in the New Era, 2011(12): 1-8. (in Chinese)
- [2] 陈安强, 崔济多, 杨志鹏, 等. 美国高速垂直起降飞行器预研项目发展及启示[J]. 飞航导弹, 2021(1): 91-98.
CHEN Anqiang, CUI Jiduo, YANG Zhipeng, et al. Development and enlightenment of the pre-research project of American high-speed vertical take-off and landing aircraft[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(1): 91-98. (in Chinese)
- [3] 李昊. 美国“联合多任务旋翼机”项目发展及预测[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://doi.org/10.28081/n.cnki.nchqb.2015.000647>.
LI Hao. Development and forecast of the U. S. "joint multi-mission rotorcraft" project[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://doi.org/10.28081/n.cnki.nchqb.2015.000647>. (in Chinese)
- [4] 张岸佳. 美国会研究服务处概述陆军未来垂直起降项目情况[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://new.qq.com/omn/20191126/20191126A-095GD00.html>.
ZHANG Anjia. An overview of the army's future vertical take-off and landing projects by the American Congress Research Service[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://new.qq.com/omn/20191126/20191126A-095GD00.html>. (in Chinese)
- [5] GIANGRECO L. US Army sounds defiant note on FVL programme[J]. Flight International, 2017, 192: 13.
- [6] 李昊. 美国陆军 FVL 项目持续推进[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://doi.org/10.28081/n.cnki.nchqb.2016.000727>.
LI Hao. The advance of the U. S. Army FVL program[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://doi.org/10.28081/n.cnki.nchqb.2016.000727>. (in Chinese)
- [7] SUSHEREBA C, DIULIO J B, MILITELLO L G, et al. A tradespace framework for evaluating crewing configurations for future vertical lift[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2019, 63(1): 352-356.
- [8] TADJDEH Y. X-Plane may impact future vertical lift program[J]. National Defense, 2016, 100: 18.
- [9] 李昊. 美国开展下一代高速旋翼机技术预研项目[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://doi.org/10.28081/n.cnki.nchqb.2014.001088>.
LI Hao. The U. S. launches the next-generation high-speed rotorcraft technology pre-research project[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://doi.org/10.28081/n.cnki.nchqb.2014.001088>. (in Chinese)
- [10] 申超, 张宁, 张翼麟, 等. 燕鸥——美国非航母主力战舰上的捕食者级垂直起降无人机[J]. 飞航导弹, 2017(1): 34-38.
SHEN Chao, ZHANG Ning, ZHANG Yilin, et al. Tern-predator-class vertical take-off and landing drone on U. S. non-aircraft carrier main battleship[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(1): 34-38. (in Chinese)
- [11] KENYON H S. Navy turns to TERN to make every ship an aircraft carrier[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.afcea.org/content/navy-turns-tern-make-every-ship-aircraft-carrier>.
- [12] Security Global. Tactically exploited reconnaissance node (TERN)[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.globalsecurity.org/intell/systems/tern.html>.
- [13] 张昊. 美海军陆战队提出舰载垂直起降无人机项目信息需求[J]. 现代雷达, 2018, 40(4): 82.
ZHANG Hao. The U. S. Marine Corps proposes information requirements for ship-borne vertical take-off and landing UAV project[J]. Modern Radar, 2018, 40(4): 82. (in Chinese)

- nese)
- [14] 彩林. 美国海军陆战队发布远征无人机需求计划[EB/OL]. [2021-09-03]. <http://www.aeroinfo.com.cn/Item/23285.aspx>.
CAI Lin. U. S. Marine Corps releases expeditionary drone demand plan[EB/OL]. [2021-09-03]. <http://www.aeroinfo.com.cn/Item/23285.aspx>. (in Chinese)
- [15] 杨传广, 马铁林, 甘文彪, 等. 垂直起降固定翼无人机技术特点浅析[C]// 2017年(第三届)中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学会, 2017: 6.
YANG Chuanguang, MA Tielin, GAN Wenbiao, et al. Analysis on technical characteristics of vertical takeoff and landing fixed-wing UAV[C]// 2017 the 3rd China Aeronautical Science and Technology Conference. Beijing: CSAA, 2017: 6. (in Chinese)
- [16] UAS Vision. Rheinmetall airborne systems practical hybrid UAS[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.uasvision.com/2012/09/03/rheinmetall-airborne-systems-tactical-hybrid-uas/>.
- [17] THAMM F P, BRIEGER N, NEITZKE K P, et al. Songbird: an innovative UAS combining the advantages of fixed wing and multi rotor UAS[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 4(1): 345-349.
- [18] 成都纵横自动化技术股份有限公司. 无人机系统—垂直起降固定翼[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.jouav.com/zh/flight-system-type/drones>.
Chengdu Zongheng Automation Technology Co., UAV system-vertical take-off and landing fixed wing [EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.jouav.com/zh/flight-system-type/drones>. (in Chinese)
- [19] 徐广, 招启军, 徐国华. 无人驾驶鸭式旋翼/机翼飞行器的发展及其关键技术[C]// 2006中国无人机大会. 北京: 中国航空学会, 2006: 130-136.
XU Guang, ZHAO Qijun, XU Guohua. The development and key technology of unmanned canard rotor/wing aircraft [C] // 2006 China UAV Conference. Beijing: CSAA, 2006: 130-136. (in Chinese)
- [20] 赵飞龙. 鸭式旋翼/机翼飞行器流场及气动特性分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
ZHANG Feilong. Research on the flowfield and aerodynamic characteristics of canard rotor/wing aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [21] 邓阳平. 新概念旋转机翼飞机旋翼技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
DENG Yangping. Research on rotor technology for rotor wing plane[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [22] 鲁隽. 波音的“蜻蜓”鸭式旋翼/机翼方案验证机[J]. 国际航空, 2001(12): 27.
LU Juan. Boeing's "Dragonfly" canard rotor/wing program demonstrator[J]. International Aviation, 2001(12): 27. (in Chinese)
- [23] Sina. Boeing_X-50A_dragonfly_CRW (canard_rotor_wing) [EB/OL]. [2021-09-03]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_6b8231b80102ys4r.html.
- [24] 西北工业大学民用无人机研发中心. 旋转机翼飞机(灵龙) [EB/OL]. [2021-09-03]. <http://wurenji.nwpu.edu.cn/info/1116/1126.html>.
Northwestern Polytechnical University Civil UAV R&D Center. Rotating wing aircraft (Linglong) [EB/OL]. [2021-09-03]. <http://wurenji.nwpu.edu.cn/info/1116/1126.html>. (in Chinese)
- [25] 任娜. 无人机垂直起降高速飞行——西工大“灵龙”无人机登上央视[EB/OL]. [2021-09-03]. https://www.sohu.com/a/457937792_160914.
REN Na. The UAV takes off and landed at a high speed and flies at a high speed: Northwestern Polytechnical University "Linglong" UAV boarded on CCTV [EB/OL]. [2021-09-03]. https://www.sohu.com/a/457937792_160914. (in Chinese)
- [26] AEROVEL. Flexrotor[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://aerovel.com/flexrotor/>.
- [27] 申超, 蒋琪, 宋怡然. “燕鸥”——美非航母主力战舰上的“捕食者”级垂直起降无人机[C]// 第七届中国航空学会青年科技论坛. 北京: 中国航空学会, 2016: 278-283.
SHEN Chao, JIANG Qi, SONG Yiran. Tern-predator-class vertical take-off and landing drone on U. S. non-aircraft carrier main battleship[C]// The 7th China Aeronautical Society Youth Science and Technology Forum. Beijing: CSAA, 2016: 278-283. (in Chinese)
- [28] KELLER J. DARPA awards contract for TERN program for long-endurance UAVs launched from small ships [EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.militaryaerospace.com/unmanned/article/16715273/darpa-awards-contract-for-tern-program-for-longendurance-uavs-launched-from-small-ships>.
- [29] 堵开源. 简氏防务周刊关注中国VD-200垂直起降飞翼无人机[EB/OL]. [2021-09-03]. https://www.guancha.cn/military-affairs/2016_03_31_355631.shtml.
DU Kaiyuan. Jane's defense weekly pays attention to China's VD-200 vertical take-off and landing flying-wing UAV[EB/OL]. [2021-09-03]. https://www.guancha.cn/military-affairs/2016_03_31_355631.shtml. (in Chinese)
- [30] 李文杰, 徐文. 贝尔公司将研制全尺寸鹰眼无人机[J]. 飞航导弹, 2004(5): 1.
LI Wenjie, XU Wen. Bell will develop a full-size Hawkeye drone[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2004(5): 1. (in Chinese)
- [31] Naval Technology. Bell eagle eye tiltrotor UAV[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.naval-technology.com/proj>

- ects/belleagleeyuav/.
- [32] Naval Technology. Bell V-247 vigilant tilt-rotor unmanned aircraft system[EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.naval-technology.com/projects/bell-v-247-vigilant-tilt-rotor-unmanned-aircraft-system/>.
- [33] 吴思亮, 宁波, 陈宇. 以色列军用无人机发展概览[J]. 航空世界, 2016(4): 52-55.
WU Siliang, NING Bo, CHEN Yu. An overview of the development of Israeli military drones[J]. Aviation World, 2016(4): 52-55. (in Chinese)
- [34] Factory Military. The KARI TR-60 managed a take-off and landing from the deck of a moving ship in July of 2017[EB/OL]. [2021-09-03]. https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.php?aircraft_id=1856.
- [35] 赵长辉, 段洪伟, 张安平. 阿古斯塔项目零新型垂直起降技术验证机[C]//2014(第五届)中国无人机大会. 北京: 中国航空学会, 2014: 34-38.
ZHAO Changhui, DUAN Hongwei, ZHANG Anping. Agusta project zero new vertical take-off and landing technology verification machine[C]//2014 (5th) China UAV Conference. Beijing: CSAA, 2014: 34-38. (in Chinese)
- [36] 于进勇, 王超. 垂直起降无人机技术发展现状与展望[J]. 飞航导弹, 2017(5): 37-42.
YU Jinyong, WANG Chao. Development status and prospects of vertical take-off and landing UAV technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(5): 37-42. (in Chinese)
- [37] 段洪伟, 赵长辉, 王琦. 新型垂直起降无人机的发展[C]//2014(第五届)中国无人机大会. 北京: 中国航空学会, 2014: 109-115.
DUAN Hongwei, ZHAO Changhui, WANG Qi. The development of new vertical take-off and landing drones[C]//2014 (5th) China UAV Conference. Beijing: CSAA, 2014: 109-115. (in Chinese)
- [38] ROTHHAAR P M, MURPHY P C, BACON B J, et al. NASA Langley distributed propulsion VTOL tilting aircraft testing, modeling, simulation, control, and flight test development [C]// AIAA Aviation Technology, Integration, & Operations Conference. [S. l.]: AIAA, 2014: 1-14.
- [39] STEPHEN T. Subscale lightning strike X-plane makes first flight[J]. Flight International, 2016, 189: 16.
- [40] 逸平. 别具风格的“雷击”无人机设计[J]. 交通与运输, 2016, 32(4): 30-31.
YI Ping. Unique "lightning strike" drone design[J]. Traffic and Transportation, 2016, 32(4): 30-31. (in Chinese)
- [41] 李亮明, 高正红, 何澳, 等. 旋转机翼飞机旋翼飞行验证平台设计[J]. 航空工程进展, 2013, 4(4): 488-492.
LI Liangming, GAO Zhenghong, HE Ao, et al. Design of the rotor wing flight testing platform for rotor aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(4): 488-492. (in Chinese)
- [42] 邓阳平, 高正红, 詹浩. 鸭式旋翼/机翼飞机悬停及小速度前飞气动干扰实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(6): 563-567.
DENG Yangping, GAO Zhenghong, ZHAN Hao. Experimental investigation on aerodynamic interactions of canard rotor/wing aircraft in hover and low speed forward flight[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(6): 563-567. (in Chinese)
- [43] 孙威, 高正红. 旋转机翼飞机旋翼/机身干扰流场数值计算分析[J]. 飞行力学, 2011, 29(6): 4-8.
SUN Wei, GAO Zhenghong. Development history of low order equivalent systems for aircraft handling qualities analysis and design[J]. Flight Dynamics, 2011, 29(6): 4-8. (in Chinese)
- [44] STONE R H. Control architecture for a tail-sitter unmanned air vehicle [C]// 2004 5th Asian Control Conference. [S. l.]: IEEE, 2005: 1-7. (in Chinese)
- [45] 赵珣. 对称双翼尾座式无人机系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
ZHAO Xun. Research on symmetrical quad-rotor biplane tail-sitter unmanned aerial vehicle system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)
- [46] 李茂. 尾坐式共轴旋翼飞行器着舰策略与控制律设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
LI Mao. Flight control law and landing strategy for ship-board tail-sitter coaxial rotor aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [47] 徐敏. 倾转旋翼机的发展与关键技术综述[J]. 直升机技术, 2003(2): 40-44.
XU Min. An overview of the development and key technologies of tiltrotor aircraft[J]. Helicopter Technique, 2003(2): 40-44. (in Chinese)
- [48] 孙凯军, 张练, 付义伟, 等. 某型倾转旋翼无人机的旋翼桨叶气动优化设计[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 340-347.
SUN Kaijun, ZHANG Lian, FU Yiwei, et al. Aerodynamic optimization design of the rotor blade of a tilt-rotor aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 340-347. (in Chinese)
- [49] 赵广. 倾转旋翼机气动干扰分析及机翼优化[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
ZHAO Guang. Aerodynamic interaction analysis and wing optimization of tiltrotor aircraft [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019. (in Chinese)
- [50] 王琦, 曾祥伟. 倾转旋翼机旋翼/机翼气动干扰研究[J]. 飞行力学, 2013, 31(5): 407-410.
WANG Qi, ZENG Xiangwei. Research on rotor/wing aerodynamic interaction for tilt-rotor aircraft[J]. Flight Dynamics, 2013, 31(5): 407-410. (in Chinese)
- [51] 李治权. 倾转旋翼无人机转换和飞机飞行模式下的气弹动

- 力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- LI Zhiquan. Aeroelastic analysis of tiltrotor aircraft in conversion and airplane flight modes[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [52] TADGHIGHI H, RAJAGOPALAN R G. A user's manual for ROTILT solver: tiltrotor fountain flow field prediction [R]. Washington, D. C.: NASA, 1999.
- [53] JOHNSON W. Helicopter theory[M]. New York: Dover Publications, 1994.
- [54] 闫秋红. 垂直起降倾转四旋翼机过渡阶段控制问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- YAN Qiuhong. Control system design on the transition stage of quad tiltrotor aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [55] 张兵. 全电双共轴倾转旋翼飞行器设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- ZHANG Bing. Electric double coaxial tilt-rotor aircraft design [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [56] 缪君, 王三民, 宁嵩. 倾转旋翼无人机传动系统多状态响应特性研究[J]. 航空动力学报, 2008(8): 1427-1431.
- MIAO Jun, WANG Sanmin, NING Song. Dynamic response analysis of the transmission of tilt-rotor in different modes[J]. Journal of Aerospace Power, 2008(8): 1427-1431. (in Chinese)
- [57] 徐嘉, 范宁军. 涵道无人机研究现状与结构设计[J]. 飞航导弹, 2008(1): 10-14.
- XU Jia, FAN Ningjun. Current research status and structural design of ducted UAV [J]. Winged Missiles Journal, 2008(1): 10-14. (in Chinese)
- [58] ARMUTCUOGLU O, MEHMET S K, OZAN T. Tilt duct vertical takeoff and landing uninhabited aerial vehicle concept design study [J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(2): 215.
- [59] 李昊. 美国防高级研究计划局“垂直起降试验飞机”项目获胜方案:“雷击”无人机分析[EB/OL]. [2021-09-03]. http://www.360doc.com/content/16/0425/21/16788185_553763806.shtml.
- LI Hao. US Defense advanced research projects agency's "vertical takeoff and landing test aircraft" project winning plan: "lightning strike" UAV analysis[EB/OL]. [2021-09-03]. http://www.360doc.com/content/16/0425/21/16788185_553763806.shtml. (in Chinese)
- [60] 张毅, 李昊. 美国“雷击”垂直起降试验飞机[J]. 兵器知识, 2016(8): 36-39.
- ZHANG Yi, LI Hao. U. S. "Lightning Strike" vertical take-off and landing test aircraft[J]. Ordnance Knowledge, 2016(8): 36-39. (in Chinese)
- [61] 黄俊. 分布式电推进飞机设计技术综述[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 13-29.
- HUANG Jun. Survey on design technology of distributed electric propulsion aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 13-29. (in Chinese)
- [62] 王红波. 基于动力诱导增升垂直起降气动设计研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- WANG Hongbo. A research on an aided power-induced vertical take-off and landing configuration design [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [63] BORER N K, PATTERSON M D, GIBSON A R, et al. Design and performance of the NASA SCEPTOR distributed electric propulsion flight demonstrator[C]// 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. US: AIAA, 2016: 1-5.
- [64] VECCHIA P D, MALGIERI D, NICOLOSI F, et al. Numerical analysis of propeller effects on wing aerodynamic: tip mounted and distributed propulsion[J]. Transportation Research Procedia, 2018, 29: 106-115.
- [65] FREEMAN J L, KLUNKGT. Dynamic flight simulation of spanwise distributed electric propulsion for directional control authority[C]// 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium. US: AIAA, 2018: 1-6.
- [66] 张万意. 倾转涵道飞行器飞行动力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- ZHANG Wanyi. Research on flight dynamics of tilt ducted rotor aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [67] 李昊. DARPA“垂直起降试验飞机”项目获胜方案:“雷击”无人机分析[EB/OL]. [2021-09-03]. http://www.360doc.com/content/16/0427/05/16788185_554119689.shtml.
- LI Hao. DARPA "vertical takeoff and landing test aircraft" project winning plan: "lightning strike" UAV analysis [EB/OL]. [2021-09-03]. http://www.360doc.com/content/16/0427/05/16788185_554119689.shtml. (in Chinese)
- [68] 刘玉焘. 尾座式无人机的飞行控制器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LIU Yutao. Design of flight controller for a tail-sitter UAV [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [69] 刘春明, 罗继业. NASA 大型民用倾转旋翼机进展研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2010(4): 1-5.
- LIU Chunming, LUO Jiye. Research of NASA large civil tilt rotor development [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2010(4): 1-5. (in Chinese)
- [70] 邓阳平, 高正红, 詹浩. 鸭式旋翼/机翼飞机的技术发展及其关键技术[J]. 飞行力学, 2006(3): 1-4.
- DENG Yangping, GAO Zhenghong, ZHAN Hao. Development and key technologies of the CRW [J]. Flight Dynamics, 2006(3): 1-4. (in Chinese)
- [71] 张阳, 周洲, 王科雷, 等. 分布式动力系统参数对翼身融合布局无人机气动特性的影响[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 17-26.
- ZHANG Yang, ZHOU Zhou, WANG Kelei, et al. In-

- fluences of distributed propulsion system parameters on aerodynamic characteristics of a BLI-BWB UAV[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 17-26. (in Chinese)
- [72] KEANE P M, KEANE A J. Use of custer channel wings-wing ducts on small UAVs[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 29(3): 1-10.
- [73] ENGLAR R J, CAMPBELL B A. Development of pneumatic channel wing powered-lift advanced super-STOL aircraft[C]// 20th AIAA Applied Aerodynamics Conference. US: AIAA, 2002: 1-5.
- [74] GONG Z B, LI J, TIAN B. Numerical simulation of powered high-lift flow [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1016: 501-505.
- [75] GRIFFIN H A, GONZALEZ L F, SRINIVAS K. Computational fluid dynamics analysis of externally blown flap configuration for transport aircraft [J]. Journal of Aircraft, 2015, 45(1): 172-184.
- [76] 朱自强, 吴宗成. 环量控制技术研究[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 411-428.
- ZHU Ziqiang, WU Zongcheng. Study of the circulation control technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 411-428. (in Chinese)
- [77] RICH P, MCKINLEY B, JONES G. Circulation control in NASA's vehicle systems[R]. Washington, D. C.: NASA, 2005.
- [78] 孟琳, 叶永强, 李楠. 扇翼飞行器的研究进展与应用前景[J]. 航空学报, 2015, 36(8): 2651-2661.
- MENG Lin, YE Yongqiang, LI Nan. Research progress and application prospects of fan-wing aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2651-2661. (in Chinese)
- [79] ASKARI S, SHOJAEEFARD M H. Numerical simulation of flow over an airfoil with a cross flow fan as a lift generating member in a new aircraft model[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 2009, 81(1): 59-64.
- [80] STOLL A M. Comparison of CFD and experimental results of the LEAPTech distributed electric propulsion blown wing [C]// 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. US: AIAA, 2015: 1-6.
- [81] MERLIN P. LEAPTech to demonstrate electric propulsion technologies [EB/OL]. [2021-09-03]. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong-/Features/leaptech.html>.

作者简介:

王科雷(1991—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:飞行器总体设计,飞行器气动布局设计等。

周洲(1966—),女,博士,教授。主要研究方向:飞行器总体设计。

马悦文(1996—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

杜万闪(1999—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行力学。

郭佳豪(1993—),男,博士研究生。主要研究方向:分布式动力系统。

李旭(1993—),男,博士研究生。主要研究方向:气动特性计算分析。

张阳(1991—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

孙蓬勃(1996—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

(编辑:丛艳娟)