

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.05.008

民用高速旋翼飞行器发展战略分析及关键技术展望

吴希明¹, 吕乐丰¹, 张广林²

(1. 中国航空研究院, 北京 100029; 2. 中国航空工业发展研究中心, 北京 100029)

摘要: 面向直升机高速化的发展趋势, 总结了国外高速旋翼飞行器的发展历程, 开展了高速旋翼飞行器与直升机、通航飞机、公路、铁路等交通运输工具的效能仿真对比, 基于潜在的民用市场需求, 综合分析了高速旋翼飞行器在交通运输系统和应急救援体系中的优势与劣势。结果表明, 民用高速旋翼飞行器在中国具有明确的战略发展定位, 一方面可作为交通体系干支通、全网联的重要节点, 以突出的任务效能融入交通运输应用体系; 另一方面, 面向中远程应急救援的需要, 可满足敏捷救援体系响应速度的需求, 填补现有直升机应用领域的空白。最后, 针对重点发展构型, 展望了中国未来民用高速旋翼飞行器的关键技术。

关键词: 民用高速旋翼飞行器; 效能分析; 交通运输应用; 中远程应急救援; 关键技术; 发展战略

中图分类号: V275 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)05-0827-09

Development Strategy Analysis and Key Technology Prospect of Civil High-Speed Rotorcraft

WU Ximing¹, LYU Lefeng¹, ZHANG Guanglin²

(1. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China;

2. Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China)

Abstract: Facing the development trend of high-speed helicopters, this paper summarizes and reviews the development history of high-speed rotor aircraft. The performance analysis of high-speed rotorcraft is conducted compared with the traditional transport vehicles, such as helicopter, aviation aircraft, highway, and railway. Based on the potential civil market demand, the advantages and disadvantages of high-speed rotor vehicle in transportation system and emergency rescue system are discussed. It is clarified that civil high-speed rotorcraft has a clear strategic development position in China. On the one hand, it can be used as an important node in the whole traffic system and be integrated into the transportation application system with outstanding task performance. On the other hand, it can meet the requirements of agile response speed of rescue system for a medium- and long-range distance, which will fill the gaps in the existing helicopter application field. Finally, the key technologies of China's future civil high-speed rotorcraft are prospected according to the key development configurations.

Key words: civil high-speed rotorcraft; performance analysis; transportation application; medium and long range emergency rescue; key technologies; development strategy

收稿日期: 2022-08-15; **修订日期:** 2022-10-09

作者简介: 吴希明, 男, 研究员, 博士生导师, 南京航空航天大学 80 级校友, 国务院特殊津贴专家、航空工业飞行器总体技术首席技术专家、直 10 及直 19 武装直升机型号总设计师, 研究方向: 直升机总体设计、高速旋翼飞行器总体设计等。曾获“新世纪百千万人才工程国家级人才”“航空工业中青年自主创新领军人才”“冯如航空科技精英奖”“航空航天月桂奖”“航空金奖”等荣誉称号。

通信作者: 吴希明, E-mail: ximwu@vip.sina.com。

引用格式: 吴希明, 吕乐丰, 张广林. 民用高速旋翼飞行器发展战略分析及关键技术展望[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 827-835. WU Ximing, LYU Lefeng, ZHANG Guanglin. Development strategy analysis and key technology prospect of civil high-speed rotorcraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 827-835.

直升机具有垂直起降、空中悬停和近地机动等性能优点,已成为中国军民领域的重要装备,对中国国防现代化和社会经济建设具有重要作用。在民用领域,直升机是城市低空通航的重要交通工具,在紧急救援、医疗救护、公安执法、航空护林、旅游观光等多领域发挥着突出作用。高速旋翼飞行器融合了旋翼机和固定翼机的优点,在保留常规直升机性能特点的基础上,通过旋翼倾转、增加辅助推力装置等多种方式,飞行速度可达450 km/h以上,是未来直升机技术创新发展的重要方向^[1]。在军事领域,欧美等发达国家正在加速推进和验证新概念高速旋翼飞行器方案,美国以V-22为代表的高速旋翼飞行器已投入使用,新一代共轴刚性旋翼技术验证机正在飞行验证。近20年来,美国宇航局一直在研究民用高速旋翼飞行器概念及其对下一代航空运输系统(NextGen)的影响^[2-5],高速旋翼飞行器在商业运输方面的潜力已经得到了广泛认可,欧洲借助V-22研制成果发展的AW609民用高速旋翼飞行器即将完成适航取证。通过理论分析和“人在回路”模拟仿真,美国宇航局研究认为大型民用倾转旋翼机(Large civil tilt rotor aircraft, LCTR)可融入航空运输系统,具有较大的市场潜力,如果将短途旅客转移到LCTR垂直机场,主跑道供长途运输飞机使用,可最大限度降低因航班延误带来的影响^[3-6]。以此为基础,针对第二代大型民用倾转旋翼飞行器(LCTR2)的“重型高速旋翼飞行器系统”项目正在深入开展研究^[7-8]。“十二五”以来,中国高铁、公路、通航等产业发展迅猛,但其独特的地理环境决定了东西部分布不平衡的发展态势将长期存在,而高速旋翼飞行器可提供新的解决方案,对于中国交通运输、应急救援等民用领域具有重要的战略意义。近年来,中国国内对于高速旋翼飞行器的技术研究日益增多^[9-18],但民用高速旋翼飞行器的发展研究仍处于空白状态,亟需开展战略发展分析及关键技术研究。

本文面向直升机高速化的发展趋势,总结回顾了国外高速旋翼飞行器的发展历程,构建了效能仿真模型,开展了高速旋翼飞行器与直升机、通航飞机、公路、铁路等运输工具的效能对比,综合考虑了高速旋翼飞机器在交通运输系统和应急救援体系中的优势与劣势。基于潜在的市场需求分析,确定了高速旋翼飞机器在中国民用领域的重点发展构型和战略发展定位。最后,对中国民用高速旋翼飞行器的关键技术进行了展望。

1 高速旋翼飞行器发展历程

1.1 概念探索阶段

20世纪60年代中期,世界各国直升机行业开始探索提高直升机飞行速度的新技术。西科斯基公司在大获成功的S-61/H-3基础上进行改装,打造了S-61F/NH-3复合式高速直升机,并基于前行桨叶概念(Advancing blade concept, ABC)旋翼,打造了一款共轴刚性旋翼构型高速直升机XH-59A。XH-59A采用前行桨叶概念和共轴双旋翼构型,充分利用了旋翼前行侧动压力大的优势,避免了后行侧失速对飞行速度的限制;在高速飞行时,采用推力桨提供所需的前进力,并通过降低旋翼转速以减弱前行桨叶激波的限制。该构型结构紧凑,保留了常规直升机低空机动能力,并可实现大幅度的速度提升,但也暴露了整机空重比低、旋翼振动载荷大、整机升阻比低等问题^[9]。

倾转旋翼机技术是国外探索的另一种高速直升机构型。倾转旋翼机通过旋翼系统在垂直与水平位置之间的倾转,实现垂直起降和高速前飞。通过近20年的探索,XV-15从飞行原理的角度验证了“倾转旋翼”概念的可行性和优越性,尽管暴露出来该构型在动力学方面的复杂性,但取得的技术成果为后续V-22的研制奠定了基础,特别是旋翼、短舱的设计直接沿用到V-22。该阶段典型高速旋翼飞行器如图1所示。

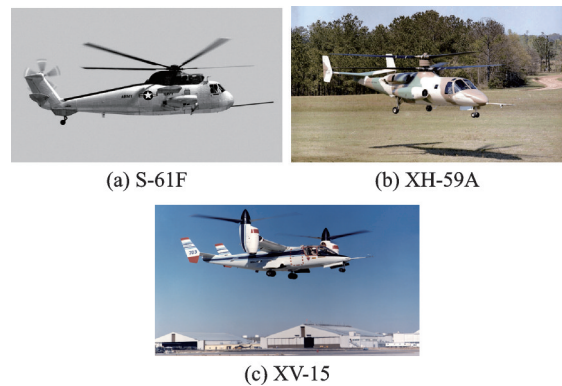


图1 概念探索阶段的典型高速旋翼飞行器

Fig.1 Typical high-speed rotorcraft during period of concept exploration

1.2 技术突破阶段

经过近30年的艰苦探索,随着复合材料、桨叶设计与制造、振动控制和电传飞控等技术的发展,共轴式、倾转式先后突破技术瓶颈,高速旋翼飞行器工程应用成为现实。

20世纪80年代初,借助于“多军联合先进垂直起降飞机”计划,贝尔和波音联合研制了倾转旋翼机V-22“鱼鹰”(图2(a)),通过大量的试验试飞,历时15年终于

突破了旋翼/机翼气动干扰下的气动特性、旋翼/短舱/倾转机构设计等一系列关键技术,2005年被批准投入生产与部署,该机巡航速度达到582 km/h、有效作战半径为722 km。1996年起,面向VIP包机运输、医疗救护和海上石油运输等场景,贝尔、波音与阿古斯塔·韦斯特兰先后开展了民用倾转旋翼飞行器AW609的研发。该型机采用先进复合材料结构,配装电传飞行控制系统、智能告警系统和全权限数字发动机控制系统,具备多种构型配置,探索了民用倾转旋翼机的取证标准,推动了倾转旋翼机适航标准的制定。

2005—2015年,随着空重比大、振动水平高等技术难题的解决,共轴刚性旋翼构型也取得技术突破,集研究成果于一身的X-2技术验证机(图2(b)),达到463 km/h的水平飞行速度,比传统直升机提高了15%,验证了ABC旋翼技术的可行性和性能潜力。

2007年,欧洲直升机公司研制的双复合推力高速旋翼飞行器X-3(图2(c))在去掉常规直升机尾桨的基础上加装推力桨和水平短翼,两侧的推力桨提供向前推力,并可平衡旋翼的反扭矩,机身短翼在高速飞行时可提供额外的升力,对旋翼进行卸载。X-3构型解决了因“旋翼前倾导致阻力大,升力不够”而限制飞行速度的问题,并通过降低旋翼速度来推迟大速度前飞时前行侧激波的出现,巡航速度最高达到430 km/h。

停转式高速直升机是通过低速状态旋翼旋转以提供气动力,高速状态桨叶停转(S-72, X-50A)或者收缩(盘翼旋翼机),以定翼机方式提供气动力,实现兼顾低高速飞行的目的,并通过喷气发动机等可实现更高速度的飞行。但旋翼系统要兼顾旋转和固定/收缩状态,气动效率较低,独特的布局、桨尖喷气设计和停转旋翼设计给飞行控制带来了很大的挑战,X-50A(图2(d))投入的两架验证机都因此坠毁,直接导致项目终止。从现阶段技术水平看,停转类直升机完全摆脱常规直升机设计和限制因素,将性能追求到极致仍不太现实。但不可否认,停转类直升机仍是未来发展的一大方向。



图2 技术突破阶段的典型高速旋翼飞行器

Fig.2 Typical high-speed rotorcrafts during period of technological breakthrough

1.3 蓬勃发展阶段

美国陆军为降低未来垂直起降飞行器(Future vertical lift, FVL)项目中型号研制的风险和成本,在2010年提出了FVL联合多用途旋翼飞行器(Joint multi-role, JMR)子项目,通过研发多种构型旋翼飞行器技术验证机来验证平台与任务系统的先进技术,以满足更高速度、生存性和可靠性,更大航程和有效载荷的共性需求,支撑后续不同吨位和用途的旋翼飞行器研发。

在FVL-JMR项目的牵引下,美国西科斯基-波音团队以13 t级的共轴刚性旋翼构型高速直升机SB>1(图3(a))参与竞标,并顺利成为进入到飞行验证阶段的两型高速旋翼飞行器之一,其设计巡航速度约为425 km/h,最大飞行速度约为460 km/h,并展现出良好的近地面机动能力。

美国和欧洲正在发展第三代倾转旋翼机,如图3所示,图中贝尔直升机公司在美国陆军“联合多用途旋翼机”项目中推出了下一代倾转旋翼机V-280(图3(b))的研究计划。V-280在V-22基础上进行了技术升级,提升了低速飞行的机动性,并进一步提高运输效率和航程。欧洲直升机公司联合策划了总质量为10 t级、20座的ERICA倾转旋翼机(图3(c))研究方案,该方案旨在进一步提升倾转旋翼机的效率。

在“洁净天空2”项目的支持下,莱奥纳多公司正在开发下一代民用倾转旋翼机(NGCTR)(图3(d))^[19]技术验证机,探索5项新技术:发动机短舱采用固定水平安装方案,可倾转式减速器,先进发动机短舱结构,可将倾转旋翼/机翼与全权限数字发动机控制综合在一起的先进飞控系统,以及机翼外翼段倾转以降低垂直飞行过程中由旋翼下洗气流施加给机翼的载荷。该项目计划于2023年试飞,目标与AW139相比,CO₂排放量降低50%,NO_x排放量降低14%,噪声降低30%。



图3 蓬勃发展阶段的典型高速旋翼飞行器

Fig.3 Typical high-speed rotorcrafts during period of flourishing

2 高速旋翼飞行器效能优势分析

任务效能是评估民用飞行器市场竞争力的核心指标之一。在不考虑其他因素的条件下,构建基于单位时间运量的任务效能评估模型

$$E = \ln \left(\frac{T_c}{\ln(T_i + 1)} + 1 \right) \quad (1)$$

式中: T_c 为单位时间运输量 $T_c = Q/T_i$; Q 为运输任务质量; T_i 为总运输时间,包括转运时间、运输时间和装卸时间,下标 i 代表第 i 种运输工具。

本文基于武汉-上海城际物资运输的任务想定构建了2种任务场景,其中任务场景I为10 t紧急医疗物资运输,任务场景II为4 000 t大宗外贸商品运输。在评估的过程中,综合考虑了往返次数、转运时间及装卸货时间。表1给出了两个任务场景下的任务效能仿真结果。不难看出,在运输距离一定的情况下,运送小吨位的紧急物资时,高速旋翼飞行器在时间上具有极大优势;如果运送大宗商品,小吨位高速旋翼飞行器任务载荷较低,在往返运输的过程中需要耗费时间,与水运、高铁、航运等传统运输工具相比并不占优势,仅高于公路、小吨位飞机和直升机,但大吨位高速旋翼飞行器则明显存在优势。

表1 运输工具效能评估

Table 1 Performance analysis for different transportation vehicles

序号	运输工具	转运距离/出发点/km	运输距离/km	转运距离/到达点/km	运输时间/h (场景I)	任务效能 (场景II)
1	水运	17	1 050	41	43.57	7.41
2	航运 (波音747)	40	725	35	3.33	5.89
3	航运 (新舟60)	40	725	35	6.91	1.32
4	高铁	36	1 255	34	5.82	7.20
5	公路	0	857	0	9.72	1.53
6	直升机 (AC313)	0	705	0	14.02	0.63
7	HSRC-10	0	705	0	1.48	3.62
8	HSRC-25	0	705	0	1.46	8.18

注:HSRC-10和HSRC-25分别表示有效载荷为10 t和25 t的高速旋翼飞行器。

影响任务效能的参数包括任务质量、路程、速度和转运路程。各种交通运输工具速度和单程载重通常保持不变,可视为常数,速度与路程正相关。因此,分析任务质量 Q 和路程 L_i 对任务效能的影响有着重要的意义。运输效能模型可简化为

$$\eta_i = \frac{Q}{k_{vw}L_iQ + k_{ab}L_{iab}Q + C} \quad (2)$$

式中: L_i 为路程; L_{iab} 为转运路程; k_{vw} 、 k_{ab} 为与速度和载重有关的系数; C 代表装卸货时间。

从式(2)可知,当任务质量 Q 一定时,任务效能和路程 L_i 呈反比,当 L_i 足够大时,任务效能对 L_i 的变化不再敏感。在分析中,选取任务质量上限为4 000 t,运输路程最大为1 000 km,转运路程按各地区的平均值80 km来计算。

图4给出了任务质量 Q 为4 000 t时,任务效能随运输路程的变化规律。从图中可以看出,运输路程较短时,高速旋翼飞行器的任务效能较高;运输路程较大时,高铁运输的任务效能较高。在0~194 km区间内,高速旋翼飞行器的任务效能大于其他运输工具;在0~356 km的区间内,商载为10 t的高速旋翼飞行器的任务效能最高。这是由不同运输方式的特性决定的,在相同载重下,运输路程越大,运输过程中耗费的时间越长,而铁路载重量比较大,可以实现单次运输,而高速旋翼飞行器则需要往返多次。因此,随着运输路程的增大,高速旋翼飞行器“点对点”运输直达的优势逐渐被抵消。

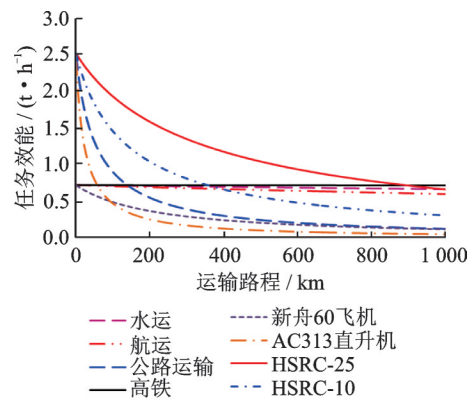


图4 任务效能与路程的变化规律

Fig.4 Effect of distance on mission performance

图5分别给出了路程为356 km和路程为1 000 km时,任务效能与任务重量的关系。任务重量对任务效能的影响主要体现在运输时间上。运输路程会影响到系数 k_{vw} ,从而影响到任务效能。从图中可以看出,随着任务质量的增加,任务效能基本趋近于一个常数。任务质量较小时,高速旋翼飞行器具有极大的优势;任务质量较大时,任务效能与运输路程相关性更高。针对356 km以内的中短途运输,商载25 t的高速旋翼飞行器的任务效能最高。随着载重量的减小,这一运输区间也将缩小。针对356 km以上的长途运输,较小吨位高速旋翼飞行器则逐渐失去优势,这也是由于高铁等运输方式单趟运输量较大、节省了往返时间的原因。因此,当任务质量较小时,高速旋翼飞行器具有优势;当任务质量较大时,高铁等更具有效能优势。

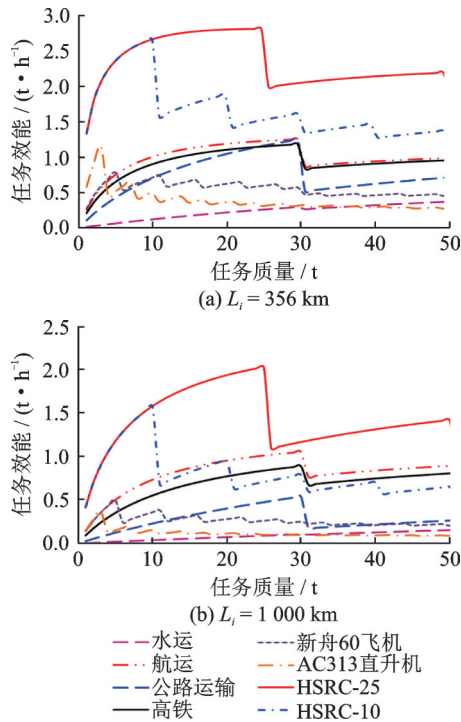


图 5 任务效能与任务质量的变化规律
Fig.5 Effect of mass on mission performance

通过以上算例可以得到民用高速旋翼飞行器的优势效能区间,即:在紧急运输的情况下,高速旋翼飞行器具有压倒性优势;在中短途的运输中,高速旋翼飞行器具有绝对优势;在长途的运输中,高速旋翼飞行器效能优势与任务质量相关。在运输路程比较小时,高速旋翼飞行器始终具有优势;在运输路程比较大时,高速旋翼飞行器在大于某个范围的转运路程区间具有优势。

以《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标》^[20] 给出的中国未来城镇化发展的空间格局为标准,以中国国内主要城市为基点,结合高速旋翼飞行器的效能优势研究表明:在中国中部、东部、南部等地区,高速旋翼飞行器在区域交通运输中具有绝对优势。几乎所有区域和城市群都可以实现快速抵达、高效运输。

在中国路网不太发达的东北、西北和西藏地

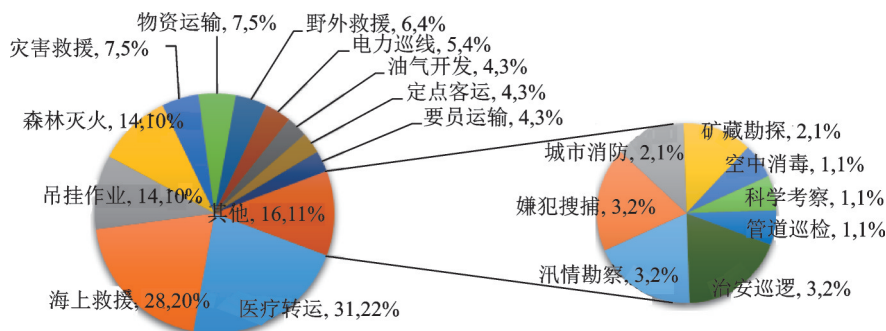


图 7 民用直升机典型任务分布统计图

Fig.7 Statistics chart for typical mission of civilian helicopter

区,普通交通方式难以抵达,运输困难。在这些地区,高速旋翼飞行器几乎能够覆盖所有的区域,能够到达任何想去的地方,且在 80.9% 的区域内具有绝对优势。

综合来看,若以各个省会、主要城市为基点,辐射周边区域和城市群的交通运输,则在中国 91.2% 内的区域内,高速旋翼飞行器在时效性和运力上均具有优势,且能够覆盖中国几乎所有地理板块、领海,能够满足各类任务需求。

3 高速旋翼飞行器应用领域和应用市场

根据民航局颁布的《民航综合统计报表制度》^[21] 进行通航业务领域典型应用梳理,从机型分类、机队情况、飞行小时、地域分布和机场分布等方面开展了中国通航市场发展现状的研究,其中 2020 年中国通航飞行小时应用领域分布如图 6 所示。基于不同来源信息的统计分析,中国民用直升机从开始应用至今完成的各种任务分布如图 7 所示。图 7 中各类任务后的第一个数值表示具体任务场景的数量,第二个数值表示该类任务场景占全部任务场景的比例。

通过运用趋势外推、市场因子推演等方法,综合构建民用高速旋翼飞行器市场预测模型为

$$F_{n+1} = F_n(1 + \alpha) \quad (3)$$

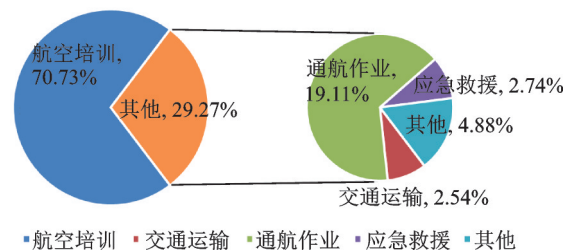


图 6 2020 年中国通航飞行小时应用领域分布

Fig.6 Application domain distribution of flying hours in China general aviation in 2020

$$C_n = F_n \cdot \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 + \frac{b-a}{N} \right)^i \quad (4)$$

式中： F 为当年机队规模； n 为年份； a 为增长率； C 为当年的细分市场规模； a 为期初的市场份额； b 为期末的市场份额。

结合高速旋翼飞行器市场发展特点，针对通

用航空、交通运输和应急救援等民用领域，研究建立了高速旋翼飞行器潜在优势和应用场景如图8所示，其中横坐标表示高速旋翼飞行器在该应用场景下的市场需求，自左向右市场需求量逐渐增加；纵坐标表示高速旋翼飞行器在该应用场景下的比较优势，自下向上竞争优势越来越大。

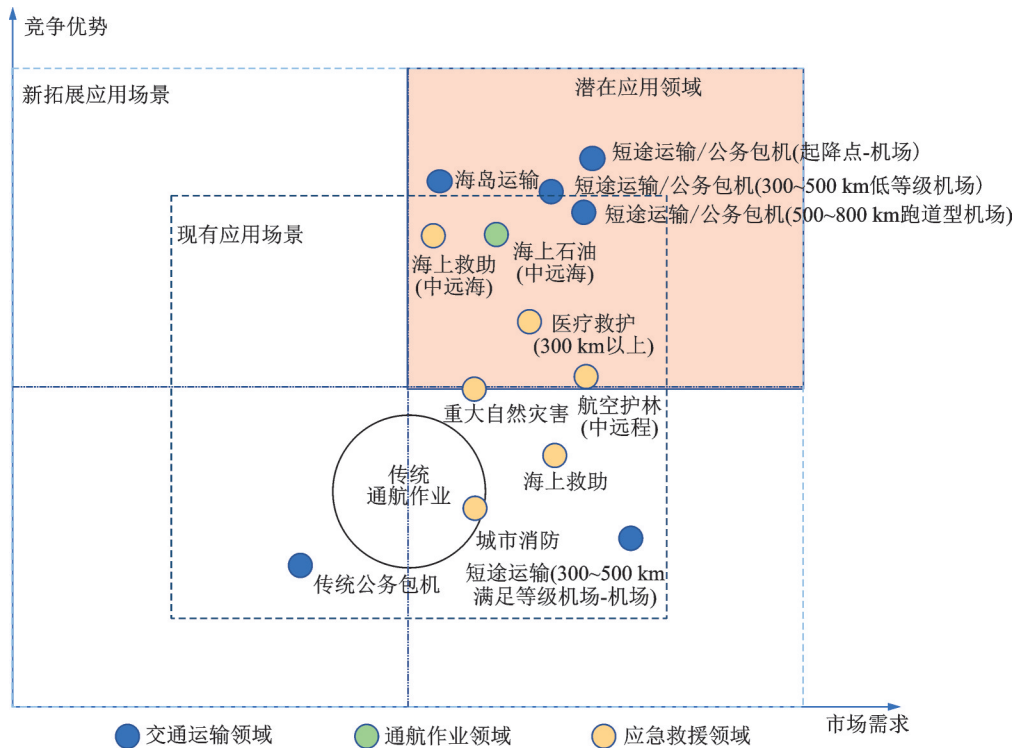


图8 高速旋翼飞行器潜在优势应用场景对比

Fig.8 Potential application scenarios of high-speed rotorcrafts

在交通运输领域，高速旋翼飞行器兼顾了旋翼机和固定翼飞机运输的优点，无需依托特有的运输网络和基础设施，在快速性和便捷性上具有独特优势，与常规直升机相比，速度更快、航程更远、载重更大，作为一种正在兴起的运输方式，在运输领域还存在着等待开发的市场，拥有着巨大的潜力。在短途运输领域，高速旋翼飞行器可突破传统飞机受制于机场跑道等基础设施限制，与其他交通工具相比，可缩短航时，在构建“起降点-机场”短途运输、“300~500 km”机场-机场的短途运输方面具有明显的市场潜力；在海岛运输方面，高速旋翼飞行器可垂直起降，便于在海岛上部署，也无需建设任何跑道和机场，较其他交通运输工具具有明显的速度优势和航程优势，在海洋运输和海洋旅游等领域具有较大的市场潜力；在公务包机方面，高速旋翼飞行器可提升客户出行效率，扩展城市周边的包机服务距离，避免机场交通堵塞等优势，可作为VIP服务的主用交通工具，替代涡桨包机飞行。

在应急救援领域，国内航空应急救援整机装备

采购市场规模从价值量上看预计未来10年共计达500亿元左右，未来10年每年市场增长率达到15%左右。从整机装备价值量占比来看，预计以有人旋翼机为主，占比超过70%。从整机装备类型需求来看，中大型旋翼航空器是现阶段应急救援市场需求的主力机型，需求最急迫。而国内航空应急救援服务采购市场规模从价值量上看预计未来10年每年共计达300亿元左右，市场增长率达到10%左右。在航空护林领域，高速旋翼飞行器可作为大型装备补充，对于提升作业效率、拓宽作业覆盖半径、快速响应有明显优势，在中远程机降扑火和空投空运领域有潜在的市场需求；在海上救助领域，垂直起降的高速旋翼飞行器在速度上有非常大的优势，特别是对于中远海距离的海上搜救作业，可以迅速到达搜救区域执行巡视搜救任务，时效性更强、航程更远，可填补中高吨位旋翼机缺乏、中远海搜救能力薄弱的空白；在医疗救护领域，高速旋翼飞行器在扩展直升机救援服务半径，提升中远程医疗救护效率等领域具有比较优势；在地震救援、洪涝救

援等自然灾害救援领域,高速旋翼飞行器在中远程人员投送、应急抢险等对作业响应要求较高的作业任务下,能够发挥其速度快、载荷大、基础设施要求低等作业优势,与传统直升机或固定翼形成差异化能力互补。

针对中国民用高速旋翼飞行器的竞争格局和潜在的应用场景,可以从替代现有装备和新拓展的应用领域两个方面预测中国未来民用高速旋翼飞行器的市场需求。截至 2019 年底,中国民用直升机保有量 1 237 架^[22],按照每年平均 8%~10% 的增量,预计到 2050 年,民用市场机队规模将达到 13 000 架以上,若高速旋翼飞行器替代常规直升机和通航飞机总体规模的 10%,则市场潜力预计超过 1 100 架。针对拓展的应用领域,假设需求量占比 30%,预计约 330 架,则中国民用高速旋翼飞行器的市场需求总量约 1 430 架。根据公开数据显示,AW609 未来市场销售价格约为 2 500 万美元,以此保守估计,市场需求价值总量将超过 2 300 亿元。

4 高速旋翼飞行器产品发展策略

为进一步明确中国未来民用高速旋翼飞行器的产品发展策略,本文针对交通运输、应急救援和

通航作业等领域的应用场景需求,归纳出主要任务剖面想定并进行了不同构型高速旋翼飞行器任务效能计算和任务适应性分析。

图 9 给出了典型任务想定下的各构型任务效能对比,可以看出,倾转旋翼构型更适用于对运载量和时效性有所需求的运输类任务,在物资运输方面具有明显的任务效能优势。对于干支线交通运输任务,倾转旋翼机在大范围点对点的快速运输任务中且具有明显的效能优势;对于通航作业任务,也仍然能较好完成通航作业任务;对于低速任务,如高原电力巡线,倾转旋翼飞行器任务效能较低,不适用于此类任务类型;在不同的海拔环境下,倾转旋翼飞行器在不同任务中均具有不同程度的效能优势,能够适用于中国各大地理板块,具有更好的适用性。因此,倾转旋翼飞行器更适合中国民用航空应急救援、货物运输、客运等任务。而共轴式与复合式构型高速旋翼飞行器具备更好的机动性、悬停和垂直起降性能,适用于对机动性、近地机动/悬停能力要求较高的任务。考虑到这两类构型空重比较大,飞行速度依然限制在 450 km/h 左右,且不适用于中型以上吨位,比较适用于特定条件下的通航作业任务、复杂地形环境的应急救援等任务。

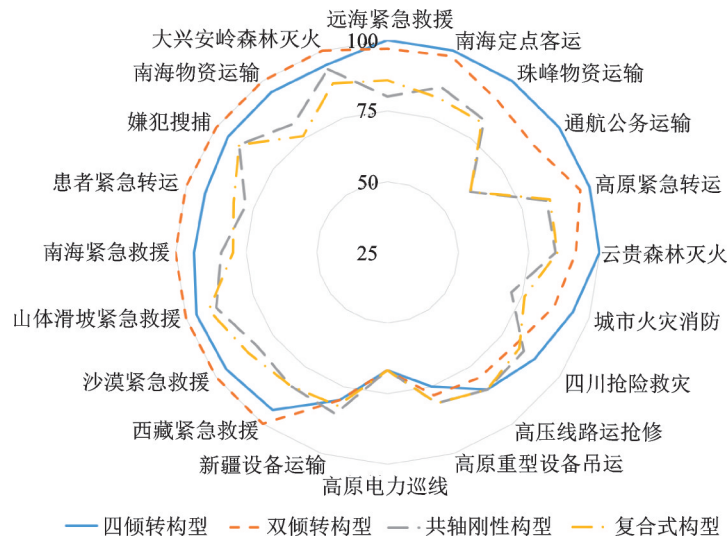


图 9 不同任务想定下的各构型任务效能对比

Fig.9 Performance comparison of various configurations for different application scenarios

结合效能优势分析、市场研究与任务适应性等研究结果,本文认为中国未来民用高速旋翼飞行器的产品发展策略主要体现在:

(1)发展民用高速旋翼飞行器对于加快中国经济结构转型和产业升级,促进区域经济协调发展,引领科技发展方向具有重大作用,可为中国民用直升机产业的发展带来全新的机遇和颠覆性的影响,国家应从战略上予以重视并加大研发投入。

(2)中国民用高速旋翼飞行器具有明确的市场定位,具有独有的市场需求和广阔的市场前景,可作为交通体系干支通全网联的重要节点,以突出的任务效能融入交通运输应用体系;面向中远程应急救援需要,填补现有直升机应用领域的空白,满足敏捷救援体系响应速度的需求;具备多用途、多角色的鲜明特点,可满足交通运输、应急救援并兼顾通航作业等不同领域不同应用场景的多方面需

求;兼顾高原与平原、陆地与海洋任务能力以及气候条件,具备地理环境覆盖面广、环境适应性强等突出优势,可为满足不同地域差异化发展需求提供最佳解决方案。

(3)倾转旋翼构型更适用于中国民用领域的应用场景需求,应作为后续重点发展方向,双倾转构型和四倾转构型各有优点,运载性能不同,可根据任务需求,谱系化发展;对于共轴式构型和复合式构型,可基于军机研制成果,通过适应性改进执行一些特有的民用任务,如特定条件下的通航作业任务、复杂地形环境的应急救援任务等。

5 高速旋翼飞行器技术发展展望

(1)国外高速旋翼飞行器历经60余年的技术探索,解决了包括气动布局优化设计、飞行控制系统可靠性及混合操纵控制、新旋翼系统设计、传动系统可靠性、减振减阻减重技术、旋翼短舱转换机构设计、旋翼/机体耦合动不稳定性等关键技术,而旋翼动载荷大、飞行控制律差、传动系统可靠性低等问题直接导致多起灾难性事故。因此,上述技术领域应作为民用高速旋翼飞行器研究的重点方向,吸取教训,避免重蹈覆辙。

(2)针对倾转式构型,特别是多旋翼倾转式构型,存在异于直升机的旋翼/机翼的复杂涡系演化与干扰特征、前后旋翼非定常涡系行为与相互作用,需要针对性开展非定常流动机理与气动布局优化、旋翼气弹耦合机理与动不稳定性控制、振动载荷作用机理与抑制、倾转姿态振荡机理与飞行控制、轻量化倾转机构设计等技术研究。同时,对应倾转过渡段是关乎倾转式构型全模式飞行成功的至关重要环节,应重点突破严重影响倾转式构型过渡状态控制精度和飞行安全等问题的技术瓶颈。

(3)应在军民机设计要求差异化分析的基础上,着眼于民用高速旋翼飞行器的安全性、可靠性等适航技术研究,构建适航规章。民用高速旋翼飞行器突破了传统旋翼航空器和固定翼飞机的设计,新颖设计特征带来了更为复杂的飞行特征与操稳特性,也带来诸多新的安全风险,因此构建适用于高速旋翼飞行器的适航规章,建立与欧美对等的适航审查体系和适航验证能力是中国民用高速旋翼飞行器具备市场竞争力的前提条件。

(4)应瞄准下一代高速旋翼飞行器技术发展趋势开展特有技术研究。一是开展民用倾转旋翼新概念方案的探索和可行性验证,四旋翼倾转旋翼飞行器在不改变旋翼直径的情况下,更具悬停性能优势,尤其适用于中国特有的高原应用需求,而多旋

翼飞行器飞行控制不稳定性问题应重点关注^[1,23];二是研究变直径旋翼系统实现技术,显著提升倾转高速旋翼飞行器在不同模式下的飞行性能;三是传动系统一体化设计技术,通过移除发动机的同步机构,简化短舱和倾转系统,从本质上提高系统的安全性、简捷性和轻量化设计。

(5)考虑到目前国内高速旋翼飞行器技术基础和当前研究状态,建议研究模式由单项关键技术研究转变为核心关键技术集的联合验证,由孤立系统的验证转变为跨系统级的集成验证,针对产品目标背景图像开展关键技术研究,快速提升中国民用高速旋翼飞行器的技术成熟度。

参考文献:

- [1] 吴希明. 高速直升机发展现状、趋势与对策[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(2): 173-179.
WU Ximing. Current status, development trend and countermeasure for high-speed rotorcraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(2): 173-179.
- [2] MATT B, JIM S, KEN W, et al. Advanced vehicle concepts and implications for NextGen: NASA/CR-2010-216397[R]. [S.l.]: NASA, 2010.
- [3] JACK D, SCOTT C. Technology needs for high-speed rotorcraft: NASA-CR-177592[R]. [S.l.]: NASA, 1991.
- [4] WIELAND F, SMITH J A, CLARKE J P. Implications of new aircraft technologies on the next generation air transportation system[C]//Proceedings of the 2009 USA/Europe Air Traffic Research and Development Seminar. Napa, California:[s.n.], 2009.
- [5] Civil Tiltrotor Missions and Applications. Phase II : The commercial passenger market: NASA-CR-177576 [R]. [S.l.]: NASA/FAA, 1991.
- [6] LEBACQZ J V, SCOTT B C. Ground-simulation investigation of VTOL airworthiness criteria for control dynamics, terminal-area operations[J]. Journal of Guidance, 1985, 8(6): 761-779.
- [7] JOHNSON W, YAMAUCHI G K, WATTS M E. NASA heavy lift rotorcraft systems investigation [C]//Proceedings of the 2nd International Basic Research Conference on Rotorcraft Technology. Nanjing, China:[s.n.], 2005.
- [8] ACREE C W, HYEONSOO Y, SINSAY J D. Performance optimization of the NASA large civil tiltrotor [C]//Proceedings of the International Powered Lift Conference. London, UK: [s.n.], 2008.
- [9] 李春华, 樊枫, 徐明. 共轴刚性旋翼构型高速直升机发展研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 47-52.
LI Chunhua, FAN Feng, XU Ming. The develop-

- ment overview of coaxial rigid rotor helicopter[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(1): 47-52.
- [10] 薛蒙,孙强. 倾转旋翼机军事需求与关键技术分析[J]. *直升机技术*, 2020(1): 47-49.
XUE Meng, SUN Qiang. Tiltrotor military requirement and critical technology analysis[J]. *Helicopter Technique*, 2020(1): 47-49.
- [11] 刘星亮,徐国华,史勇杰. 共轴刚性旋翼直升机与单旋翼直升机操纵特性对比研究[J]. *飞行力学*, 2022, 40(2): 11-19.
LIU Xingliang, XU Guohua, SHI Yongjie. Comparative study of control and stability characteristics between single rotor and coaxial rigid rotor helicopter[J]. *Flight Dynamics*, 2022, 40(2): 11-19.
- [12] 苏大成,汪正中,吴令华,等. 共轴刚性旋翼直升机着舰飞行特性研究[EB/OL].(2021-02-15).<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0358>.
SU Dacheng, WANG Zhengzhong, WU Linghua, et al. Investigation of the flight characteristics for the coaxial-rigid-rotor helicopter during deck landings[EB/OL].(2021-02-15). <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0358>.
- [13] 招启军,倪同兵,李鹏,等. 倾转旋翼机流动机理及气动干扰特性试验[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(12): 2900-2912.
ZHAO Qijun, NI Tongbing, LI Peng, et al. Experiment on flow mechanism and aerodynamic interaction characteristics of tilt-rotor aircraft[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(12): 2900-2912.
- [14] 刘超凡,朱清华,刘佳. 复合式高速直升机旋翼下洗流对机翼的气动影响分析[EB/OL].(2022-02-15). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20220609.2042.002.html>.
LIU Chaofan, ZHU Qinghua, LIU Jia. Aerodynamic effect analysis of rotor downwash on wings of composite high-speed helicopter[EB/OL].(2022-02-15). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20220609.2042.002.html>.
- [15] 武上景,鲁可,汪正中,等. 前行桨叶概念高速直升机操纵冗余问题研究[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(4): 59-66.
WU Shangjing, LU Ke, WANG Zhengzhong, et al. Research on control redundancy of advancing blade concept high-speed helicopter[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(4): 59-66.
- [16] 余新,陈仁良. 倾转旋翼机短舱倾转策略对驾驶员操纵负荷的影响[J]. *航空动力学报*, 2022. DOI:doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220214.
YU Xin, CHEN Renliang. Effect of tiltrotor nacelle tilting strategy on the pilot workload[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022. DOI: doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220214.
- [17] 董凌华,杨卫东. 倾转旋翼/机翼耦合系统过渡飞行瞬态响应分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2006, 38(3): 361-366.
DONG Linghua, YANG Weidong. Transient response analysis of rotor/wing coupled during tiltrotor transition flight[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2006, 38(3): 361-366.
- [18] 郭剑东,宋彦国,夏品奇. 倾转旋翼机模型缝合鲁棒控制律设计[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(3): 393-398.
GUO Jiandong, SONG Yanguo, XIA Pinqi. Design for model fusion and robust controller of tilt rotor aircraft[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(3): 393-398.
- [19] YOUNG L A, CHUNG W W, PARIS A, et al. A study of civil tiltrotor aircraft in NextGen airspace [C]//Proceedings of the 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Fort Worth, Texas: AIAA, 2010.
- [20] 十三届全国人大四次会议. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL].(2022-05-01). http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [21] 中国民用航空局. 民航综合统计报表制度[EB/OL].(2022-02-15). <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201601/P020160115585109946072.pdf>.
- [22] 周恒. 中国民用直升机市场分析及其未来10年预测[J]. *国际航空*, 2018(4): 46-47.
ZHOU Heng. China civil helicopter market analysis and forecast[J]. *International Aviation*, 2018(4):46-47.
- [23] SUN S, DE VISSER C C. Quadrotor safe flight envelop prediction in the high-speed regime: A Monte-Carlo approach[C]//Proceedings of AIAA Sci Tech Forum. San Diego, California: AIAA, 2019.

(编辑:孙静)