

# 民用倾转旋翼机的应用需求与关键技术分析



吕乐丰,吴希明,李颖辉

中国航空研究院,北京 100029

**摘要:**倾转旋翼机适合我国民用航空任务场景,是未来民用直升机的重点发展方向,开展应用需求与关键技术分析是推进我国民用倾转旋翼机发展不可或缺的一步。基于宏观发展环境分析,本文针对应急救援、交通运输和通航作业等领域,研究了民用倾转旋翼机的应用需求。结合 XV-15、V-22 等典型倾转旋翼机的研制经验和溯源分析,从安全与适航出发,开展了民用倾转旋翼机关键技术元素的识别,并重点分析了飞行控制系统、传动系统、故障模式与安全性设计等关键技术。本文研究成果对我国民用倾转旋翼机的工程化研制具有重要的参考价值。

**关键词:**民用倾转旋翼机;应用需求;关键技术;适航安全性

中图分类号:V275

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.09.004

倾转旋翼机可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,兼具直升机和固定翼飞机的优点。相比其他高速旋翼飞行器构型,倾转旋翼机任务效能尤为突出,不仅可以作为交通体系“干支通、全网联”的重要节点,也能满足敏捷救援体系响应速度的需求<sup>[1-2]</sup>。作为民用航空应用的重要载体,倾转旋翼机是民用高速旋翼飞行器发展和未来直升机技术创新发展的重点方向。

自 20 世纪 80 年代以来,基于军机研制成果,欧美等发达国家针对倾转旋翼机在民用领域的应用需求开展了可行性评估和大量的技术研究,形成了多个民用倾转旋翼机的概念方案。民用倾转旋翼机在商业运输方面的潜力已经得到了广泛认可,美国国家航空航天局(NASA)研究认为,大型民用倾转旋翼机(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<sup>[3-6]</sup>。欧洲借助 V-22 研制成果发展的 AW609(见图 1(a))民用倾转旋翼机已完成适航取证。针对第二代大型民用高速旋翼飞行器(LCTR2)的重型高速旋翼飞行器系统项目正在开展深入研究<sup>[7-10]</sup>。欧洲直升机

公司联合策划了总质量为 10t 级、20 座的“ERICA”倾转旋翼机研究方案,该方案旨在进一步提升倾转旋翼机的效率。在“洁净天空 2”计划的支持下,莱奥纳多公司正在开发下一代民用倾转旋翼机(NGCTR,见图 1(b))技术验证机,探索 5 项新技术,以实现节能减排能力提升目标<sup>[11]</sup>,同时欧美也在积极构建包括民用倾转旋翼机在内的直升机产业体系<sup>[12]</sup>。

近年来,国内对倾转旋翼机关键技术的研究日益增多,国内有关单位以不同形式开展了倾转旋翼机关键技术或技术原理验证工作,取得了一定的研究成果,研究的关注点包括倾转旋翼机的军事需求<sup>[13-14]</sup>、气动设计<sup>[15]</sup>、噪声分析<sup>[16]</sup>、旋翼倾转策略<sup>[17]</sup>、飞行力学和控制律<sup>[18-19]</sup>等。但这些研究仅针对军事应用领域,国内民用倾转旋翼机技术研究尚处于起步阶段。“十三五”以来,国内科研院所启动了民用高速旋翼飞行器宏观需求与市场分析等发展战略研究<sup>[2]</sup>,开展了高速旋翼飞行器与直升机、通航飞机、公路、铁路等传统交通运输工具的效能仿真,明确了其在我国民用领域的战略发展定位。目前,关键技术识别的主要方法包括情报分析法<sup>[20]</sup>和专家评估法。刘静怡等<sup>[21]</sup>从结构设计、空气动力

收稿日期: 2023-05-16; 退修日期: 2023-07-08; 录用日期: 2023-08-10

引用格式: Lyu Lefeng, Wu Ximing, Li Yinghui. Application requirements and key technologies analysis for civil tiltrotor aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(09): 31-40. 吕乐丰, 吴希明, 李颖辉. 民用倾转旋翼机的应用需求与关键技术分析[J]. 航空科学技术, 2023, 34(09): 31-40.



(a) AW609



(b) NGCTR

图1 国外民用倾转旋翼机发展

Fig.1 Development of civil tiltrotor aircraft

学、飞行控制三个方面总结了倾转旋翼无人机的关键技术。蔡靖等<sup>[22]</sup>基于V-22“鱼鹰”倾转旋翼机的研制历程,论述了倾转旋翼机的几项关键技术。鉴于专家评估法的主观性和情报分析法的局限性,在军民机技术要求差异和适航安全性方面,国内较少开展民用倾转旋翼机关键技术研究,因此,为推动民用倾转旋翼机工程化,亟须开展相关技术研究。

基于宏观发展环境分析,本文针对应急救援、交通运输和通航作业等领域,研究了民用倾转旋翼机的应用需求。结合XV-15、V-22等典型倾转旋翼机的研制经验和溯源分析,从安全与适航出发,开展了民用倾转旋翼机关键技术元素的识别,并重点分析了飞行控制系统、传动系统、故障模式与安全性设计等关键技术。本文研究成果对我国民用倾转旋翼机的工程化研制具有重要的参考价值。

## 1 应用需求分析

### 1.1 应急救援领域

2022年,我国发布《“十四五”国家应急体系规划》<sup>[23]</sup>,指出到2035年,建立与基本实现现代化相适应的中国特色大

国应急体系。要求加快构建应急反应灵敏、功能结构合理的航空应急救援力量体系。引导和鼓励大型民航企业、航空货运企业建设一定规模的专业航空应急队伍,购置大型、重型航空飞行器,提高快速运输、综合救援、高原救援等航空应急能力。我国航空应急救援领域主要涉及航空护林(见图2(a))、医疗救援(见图2(b))、海上救助、城市消防等应用领域。



(a) 直升机用于航空护林



(b) 直升机用于医疗救护

图2 直升机在应急救援领域的应用

Fig.2 Helicopters in emergency rescue area

在航空护林领域,短距离作业时,由于外挂吊桶洒水作业对直升机的速度有限制,直升机飞行速度一般控制在150km/h内,满载航速不超过100km/h,倾转旋翼机与传统航空器相比并没有太多优势;在中远距离的机降灭火、空投空运等作业任务下,民用倾转旋翼机可以实施快速机动,能够发挥高速和载荷优势,可提高现有航空器作业效率的50%以上,同时拓宽现有航空器的作业覆盖半径。从作业特点来看,航空护林对民用倾转旋翼机的机型需求主要集中在大型(11~15t)以及超大型(15t以上)。相比美国、加拿大等国每百万公顷森林消防航空器平均数量为1.85架,我国护林航空器相对缺乏,民用倾转旋翼机能够有效补充当前市场需求的空缺,尤其在大载荷航空器方面。

在医疗救护领域,民用倾转旋翼机可以扩展直升机救

援服务半径,提升救护效率。与地面救护车相比,直升机急救和运送病患的速度比救护车快3~5倍,可有效降低事故死亡率40%左右。目前,医疗救护直升机主要以EC-135、贝尔429等为主,主要针对城市内和郊区,飞行半径一般不超过300km,现有主力机型舱内空间较小,导致救护设备及人员数量受限。固定翼飞机长途转运具有速度快、平稳性高等特点,但伤患人员或医疗物资需要往返两地机场,医疗救护的时效性较差。民用倾转旋翼机能够进一步提升现有直升机医疗救护效率,扩大医疗救援覆盖范围至500km以上,相较于固定翼“事发点—机场—机场—医院”的三段式转移或紧急救援服务,民用倾转旋翼机凭借高速、垂直起降的特点具备远距离的“点到点”式航空医疗救援服务能力。

在海上救助领域,由于中高吨位直升机缺乏,若事发位置超出救助范围,救助飞行队需采取转场救助或直飞事发地点执行救助再返回距离最近机场的方式进行救助,救助效率大大降低。例如,S-76直升机在204km任务半径的救援能力为8~10人,277km任务半径的救援能力只有1~2人。由于当前航空装备无法满足我国海上救助的能力需求,现有的中远海搜救作业都是由巡视船或舰载直升机进行的,搜救效率较低。民用倾转旋翼机具备垂直起降能力,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。因此,民用倾转旋翼机在中远海搜救作业领域具有较大的应用需求。

在城市消防领域,空中巡逻、空中消防等作业主要集中于城市及其周边地区。目前,我国城市消防以EC-125、小松鼠等轻型直升机执行空中巡察,大型Ka-32消防直升机承担空中灭火等任务。在短距离城市消防作业领域,民用倾转旋翼机高速、垂直起降等优势并不能得到充分发挥,民用倾转旋翼机在该领域缺乏市场竞争力。

在地震救援、洪涝救援、社会安全救助等应急救援领域,针对中远程人员投送、应急抢险等对响应要求较高的作业任务,民用倾转旋翼机能够发挥其速度快、载荷大、基础设施要求低等优势,与传统直升机或固定翼形成差异化能力互补。

## 1.2 交通运输领域

2022年,由中国民用航空局、国家发改委、交通运输部联合印发的《“十四五”民用航空发展规划》<sup>[24]</sup>中提出,以提升非枢纽机场通达性、激活潜在市场新需求为导向,鼓励创新服务产品,形成覆盖广泛、服务均等的基础网,拓展航线

网络覆盖面,实现“干支通、全网联”,在地面交通不便的偏远地区积极推进基本航空服务,加快建成支通协同的短途运输机场群,在京津冀、长三角、粤港澳大湾区和成渝等重点城市群引导建设大型综合性通用机场,按需加密低空航线。

相比固定翼飞机,倾转旋翼机对起降场地条件要求较低,不需要起降机场拥有完整跑道,可简化基础设施建设,节约建设资金成本,且后期维护面积较小,节省起降场地的运营成本。因此,倾转旋翼机在交通运输领域具有较大的应用潜力。

在短途运输领域,现有直升机的应用暂时局限于浙江省岛际航线,运用嵊泗岛上的起降点设施实现直升机起降。若其他地区开通类似短途运输航线的通用机场,民用倾转旋翼机可快速实现替代。需要注意的是,相对于直升机,民用倾转旋翼机在具有观光属性的航线上应用潜力较低,原因在于旅客选乘低空观光航线的主要目的在于观景而非快速通达,民用倾转旋翼机按正常飞行速度在空中停留时间较短,无法发挥其性能优势。但在一些偏向于快速通达的航线,如连接机场和景区的空中摆渡,即使航线带有旅游属性,民用倾转旋翼机对于时间敏感型客群仍然具有吸引力。

民用倾转旋翼机在起降阶段上的优势,还可以竞争小于150km范围的部分航线市场。对于该应用需求,虽然驾车或铁路交通成本较低,但直升机可以通过“门对门”短途运输以抵消劣势。目前,国内运输机场和部分通用机场距离城市中心较远,往返机场及候机的冗余时间是造成航空运输存在劣势的原因之一。而民用倾转旋翼机对起降条件要求较低,相较于必须使用跑道型机场的固定翼飞机,在起降场地选择上余地更大。如果目的地拥有距离市区更近的起降点,民用倾转旋翼机执飞的短途运输航线可为旅客大幅节省往返时间。如北上广深地区拥有数量可观的写字楼顶停机坪,民用倾转旋翼机可充分利用更靠近城市的起降点资源,满足高端VIP用户的需求。

## 1.3 通航作业领域

随着无人机、电动垂直起降(eVTOL)等新型航空器的发展,传统通航作业市场正面临快速的更新换代。直升机在航拍、电力巡线等传统通航业务中,主要与无人机进行竞争。当前,航拍、护林巡视等业务正逐渐被无人机替代。未来通航作业市场对于高性能、适应性强、低成本的航空器需求更为突出,特别是对低成本无人机的需求将大大压缩传统航空通航作业领域的市场需求。根据市场调研情况,结合我国通航作业各领域以及民用倾转旋翼机的作业特点,

民用倾转旋翼机在通航作业的竞争优势领域主要集中在中远海海上作业上。

目前,国家正进行南海开发,现有直升机和涡桨飞机无法胜任南沙群岛区域巡视以及岛际飞行和人员货物运输等任务。以国内远程直升机EC225为例,其最大航程为830km,而从三亚至三沙市大约350km,距离黄岩岛大约950km,而距离较远的南沙群岛950~1350km。从三沙永兴机场起飞到南沙群岛距离在800km以上,现有直升机从航程上无法满足要求。根据市场调研,民用倾转旋翼机的应用需求主要体现在中远程海上石油服务等领域,深圳、浙江以及湛江负责的海域平台一般都在180km以上,航程在2h以上,如果飞行速度提升1倍,直升机的利用效率将大幅提升,保障数量也可显著降低。在出现台风的情况下,其可以迅速高效地进行人员撤离,最低限度地降低对石油生产的影响。此外,使用民用倾转旋翼机预计会降低20%~30%的综合成本,并且可减少乘客飞行时间,提高乘客的舒适性。

## 2 关键技术元素识别

所谓关键技术,即在一个系统或某个技术领域起到重要作用、不可或缺的技术,或对产品研制存在较大风险的技术。从关键技术的定义出发,重要作用和不可或缺是关键技术识别的两个方面,即关键技术元素要满足重要性原则或新颖性原则。结合民用倾转旋翼机的特点,其重要性原则判定条件可以分解为该技术应对民用倾转旋翼机的能力需求指标、性能、研制进度或费用有重大影响,或者该技术属于国内外倾转旋翼机研制过程中重大技术难关和事故的底事件之一,或者该技术属于倾转旋翼机的发展趋势及技术研究重点。而新颖性原则判定条件可以分解为军民机技术要求存在显著差异,或者与常规直升机构型相比具有显著差异。

在倾转旋翼机关键技术分析方面,国内外一般从技术的重要性出发,主要包括气动布局优化设计技术、飞行控制系统可靠性及混合操纵控制技术、新旋翼系统概念及振动载荷控制技术、传动系统集成化控制技术、减振减阻减重技术、旋翼短舱转换机构设计、旋翼机体耦合动稳定性设计等技术领域。本文将结合新颖性原则重点开展军民机技术要求差异性、安全与适航等方面的关键技术元素识别。

回顾国外倾转旋翼机的发展历史,大致经历了概念探索、技术突破和蓬勃发展三个阶段,起到重大推动作用的主要包括XV-3、XV-15、V-22、V-280和AW609这5型倾转旋翼机<sup>[25-28]</sup>。基于公开发表的技术资料,从研制历程及主要技

术特征、关键技术及“瓶颈”因素分析等方面,开展技术验证机的溯源研究,归纳出相关技术“瓶颈”和事故,见表1。

表1 典型倾转旋翼机的坠毁事故分析

Table 1 Typical tiltrotor aircraft crash accidents analysis

序号	事故型号	事故分析
1	V-22 PT05 原型机	1991年6月11日,飞控系统中两个滚转速率传感器接线错误造成坠机
2	V-22 PT04 原型机	1992年7月20日,发动机短舱密封件可靠性故障,燃油泄漏导致发动机着火,造成坠毁
3	XV-15 技术验证机	1992年8月20日,倾转机机构螺栓松脱,造成坠机
4	V-22 PT08 低速生产型	2000年12月11日,液压系统和软件故障,造成坠毁
5	V-22 改进型	阿富汗战争期间,因战损而坠毁

对XV-15和V-22事故历史的回顾表明,这两种构型都经历了几次单发停车,并且在单发失效模式(OEI)下成功运行。第一次事故发生在美国海军V-22第5架原型机首飞时,事故原因是飞行控制系统中滚转速率传感器接线不当,导致飞行员控制诱发振荡。第二起事件为第4架V-22原型机右侧发动机短舱燃油泄漏,倾转时发动机着火、传动轴受损,导致飞机坠毁。第三次事故为XV-15技术验证机坠毁,根本原因是倾转机机构螺栓松动,因其并未按照适航审定程序开展关键系统的多余度设计和关键故障模式飞行验证。从上述事故原因可以看到,由构型或飞行模式变化带来的安全性问题是民用倾转旋翼机研制中需要解决的关键技术元素,上述故障均未与倾转旋翼机的构型特征直接相关,这些事故中的设计问题或维护问题也可能发生在涡桨飞机或直升机上。

## 3 关键技术分析

### 3.1 旋翼/机翼气动干扰

民用倾转旋翼机总体气动布局设计中存在设计变量多、耦合规律复杂、重量与性能预估不准等多种问题。同时,由于民用倾转旋翼机具有高速飞行的特点,全机减阻研究尤为重要,全机减阻尤其是气动干扰减阻不仅影响全机总体布置,而且容易导致旋翼动载荷增加,从而造成飞行隐患。在XV-3、XV-15技术验证机的研究过程中,就出现了旋翼动载荷异常导致的飞行事故。

倾转旋翼机存在旋翼/机翼的多气动面布局特征以及异于常规直升机的复杂涡系演化与干扰特征<sup>[15-16,18]</sup>。由于旋翼的倾转,旋翼涡系演化过程中会发生涡系的弯曲、畸变

与多片桨叶脱落桨尖涡的相互干扰;对于多旋翼倾转旋翼机,前旋翼脱落的桨尖涡直接撞击在后旋翼上,产生复杂的涡畸变、破碎与重组等涡演化行为,并会与后旋翼的桨尖涡发生复杂的掺混与干扰,如图3(a)所示;此外,由于机翼的存在,旋翼桨尖涡并不能充分发展,而会发生翼/涡干扰现象,在悬停状态体现为喷泉效应,巡航状态体现为滑流/机翼的相互作用,如图3(b)所示。这些复杂的涡运动行为与干扰机制,对分析方法提出了极大的挑战,是倾转旋翼机气动分析的主要难题之一。同时,多旋翼涡演化与多气动面的气动干扰不仅对旋翼的非定常气动特性与效率有很大影响,而且会引起机翼气动特性的非定常与非线性变化,导致悬停状态机翼下洗载荷增大与巡航状态升阻比减小以及力矩特征的变化,进而影响倾转旋翼机整体的气动性能。因此,摸清多气动面干扰下前后旋翼非定常涡系行为与相互作用机理,是民用倾转旋翼机方案设计需要攻克的核心关键问题之一<sup>[29]</sup>。

### 3.2 飞行控制系统

电传飞控系统(FBW)具备增稳和自动飞行模式,可以显著降低飞行员操作负担,并为所需的各种飞行模式提供灵活控制,是民用倾转旋翼机飞行控制系统的主要解决方案。电传飞控系统包括软件和硬件两部分,其中软件涵盖飞行控制律和操作系统,硬件包括作动器、电源、传感器和计算机。对于民用航空器,适航规章要求飞行控制系统的可靠性要达到一定水平,要求其导致民机安全运行或着陆的灾难性故障概率极小,即不超过 $10^{-9}$ 每飞行小时。相比军用规范,可靠性要求提高了两个数量级。针对民用倾转旋翼机,电传飞控系统的适航认证需要作为关键技术进行研究,并有必要对现有适航规章进行补充完善。此外,基于软件的系统架构设计也是民航局监管的领域,需要予以重点关注。

美国联邦航空局(FAA)采纳了RTCA/DO-178“机载系统和设备审定的软件因素”作为航空软件的审定标准<sup>[30]</sup>。数字电传操纵系统中任何涉及安全的关键部件,包括控制律和操作系统,必须达到DO-178中的A级审定标准,这个标准适用于可能的灾难性故障。由于运行软件的计算机是驾驶员和操纵面之间唯一的控制路径,数字电传操纵系统最令人担忧的问题是可靠性。如果计算机软件崩溃,飞行员将无法操纵航空器。对于民机,冗余度可以提高安全性。因此,所有电传操纵系统都是3~4冗余<sup>[31]</sup>,即3~4台计算机并行工作,并且都有各自独立的线路连接到每个操纵面,如果一台或两台计算机崩溃,其他计算机将继续工作。V-22

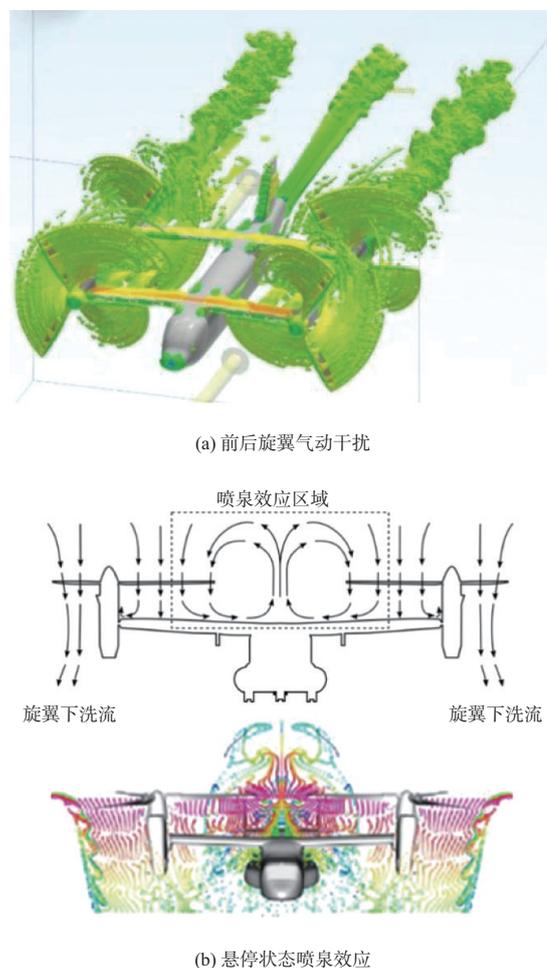


图3 倾转旋翼机气动干扰和喷泉效应

Fig.3 Aerodynamic interference and fountain effect in tiltrotor aircraft

就采用了全权限三余度数字式电传飞行控制系统,无机械备份,每个数字通道均设计自监控对,每台计算机由独立电源供电,三通道间通过交叉数据传输进行信息交互,系统具备二次故障的工作能力。在悬停及小速度(直升机模式)阶段,主要通过控制两副旋翼的总距、纵向(同向或差动)、横向以实现俯仰、滚转、偏航及高度轴的控制;在前飞(固定翼飞机模式)阶段,主要通过控制升降舵、副翼、方向舵、油门以实现相应轴的控制;另外,电传飞行控制系统还可对短舱的转角进行控制,以实现直升机模式与固定翼飞机模式两者之间的转换。

对于民用倾转旋翼机,过渡飞行阶段控制律设计技术也是亟须解决的关键技术问题。民用倾转旋翼机按最优倾转策略进行过渡时,始终面临时变倾转诱导不确定气动效应和随机内外扰动的综合影响,极易衍生多通道、多自由度振荡等难题,给安全飞行控制带来巨大挑战<sup>[19, 32-33]</sup>。而传

统飞行控制技术不具有未建模动力学效应在在线学习估计能力,在解决复杂内外扰动下倾转过渡飞行控制问题中,难以保障过渡飞行的高安全性。因此,如何自适应地估计并补偿内外扰动和倾转诱发不确定性影响,进而精确地控制民用倾转旋翼机按最优倾转策略进行过渡飞行,是完成倾转过渡必须解决的难题。另外,民用倾转旋翼机过渡过程中存在固定翼/旋翼异构冗余操纵非线性强、多通道耦合严重、控制分配安全性和效率低,异构操纵切换会衍生力/力矩扰动、飞行不稳、过渡抖动等问题,这对倾转操纵耦合机理分析与高效安全控制分配提出了严峻的挑战。因此,如何对倾转过渡控制律产生的等效力/力矩进行安全、高效的异构冗余操纵控制分配,实现过渡控制与控制分配设计解耦,是实现倾转过渡必须突破的另一个难题。

### 3.3 传动系统

传动系统是倾转旋翼机的关键动部件之一,不仅要实现不同飞行模式中的功率和转速传递,还要实现旋翼的倾转动作,是倾转旋翼机区别于直升机和固定翼螺旋桨飞机的主要体现。

倾转旋翼机传动系统的主要功能包含将发动机的动力减速传递到相应旋翼及附件系统;将两侧短舱的动力系统串联起来,从而保证单发失效时,可以由另一台发动机提供应急功率驱动两部旋翼;在液压系统的作用下,实现旋翼的倾转,保证飞行姿态。V-22传动系统<sup>[34-35]</sup>如图4所示,包括5个减速器和互连传动轴系,在飞机模式和直升机模式(短舱最大可倾斜123°)下,将发动机扭矩传递给两个主旋翼,且能使倾转旋翼机在OEI时继续运行。飞行中旋翼产生的拉力以及吊舱自身的重力通过倾转承力筒传到两个悬臂轴承上,再由轴承传递到机翼上,特别是在垂直起降时,倾转承力筒和悬臂轴承需要承受非常大的载荷。倾转承力筒和悬臂轴承是倾转旋翼机传动系统中关键部件,对倾转旋翼飞机的安全性、稳定性及可靠性具有很大的影响,因此倾转承力机构的设计至关重要。

尽管提高功重比和效率是传动系统永恒的追求,但对于民用倾转旋翼机,传动系统的可靠性与安全性技术尤为重要<sup>[28,35]</sup>。传动系统可靠性受多种因素影响,增加传动系统可靠性需要多方面的结合,包括传动系统的结构设计、零部件的材料选择、润滑系统的设计、新的设计技术和分析技术的应用等,这些在一定程度上都可以提高传动系统的可靠性。分扭一并车传动技术是将功率通过多通道传输,在同等总功率条件下显著降低运转时主传动件的载荷,以保证疲劳强度要求,增加传动系统的可靠性。进一

步发展的分扭传动结合了高重合度齿轮设计技术,使得传动系统在相同级数时具有比较高的传动比,因此可减少传动级数、提高传动系统的效率和可靠性。

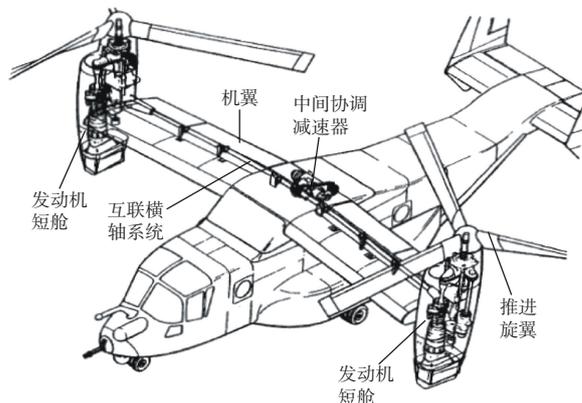


图4 V-22倾转旋翼机传动系统原理图

Fig.4 V-22 tiltrotor aircraft transmission system schematic diagram

对润滑系统任何形式的冲击都可能导致传动系统中齿轮和轴承所需润滑油的流失。如果传动系统中润滑油流失,传动系统会很快失效,导致飞行员不能及时迫降,因此提高倾转旋翼机传动系统的干运行能力很重要。适航规章对直升机都有一定的干运行能力要求,解决的办法是通过优化传动系统布局、细节设计和应急润滑来保证。此外,传动系统各零部件应用新型耐高温材料、改善冷却系统设计或者机匣内设置油兜等结构用以储备备用润滑油。增加倾转旋翼机传动系统的干运行能力,能有效提高安全性。

倾转旋翼机传动系统除了具备常规直升机传动系统功能外,需要适应直升机模式、过渡态模式以及固定翼模式的变化。旋翼减速器在工作过程中既要适应大姿态的变化,又要在姿态变化过程中稳定和连续地传递功率和载荷,还得将旋翼载荷、过渡态复杂气动载荷传递至机翼,在狭小空间内如何优化旋翼减速器齿轮传动链设计、机匣设计、集中载荷传递是本技术研究的难点。两侧发动机的动力通过固定减速器和互连传动轴系按要求传递给旋翼系统,保证左右两侧旋翼转速同步以及单发失效时发动机功率互连的功能,互连传动轴系布置在机翼内部,工作时需能适应机翼较大变形,同时受机翼的结构尺寸限制,大补偿能力柔性联轴器设计是一个技术难点。

### 3.4 故障模式及其安全性设计

OEI运行能力是民用适航规章的基本要求之一<sup>[6]</sup>。尽

管作为军机,V-22也通过传动系统保证其单发失效应急能力。在短舱中,将减速器通过传动轴与发动机相连,这种布局称为互联横轴布局。由于互连可以实现悬停滚转或由旋翼差动的俯仰控制,当一台发动机出现故障时,另一台发动机可以驱动两套旋翼系统,使倾转旋翼机继续飞行和安全着陆。无论是XV-15,还是V-22,都对这种故障模式进行了验证<sup>[25-26, 28]</sup>。制定单发失效时的操作程序需要系统性研究以下三个方面,以确保民用倾转旋翼机在OEI状态下,同时满足所有A类适航标准要求。一是如何通过最小的重量代价,通过减速器保障发动机提供足够的应急功率;二是在应急状态下,如何基于诊断系统保证功率需求,而非应急功率自检;三是在应急状态下,如何通过优化人机交互系统尽可能地为飞行员减负。

倾转过渡转换是倾转旋翼机独有的工作模式,在转换过程中,民用倾转旋翼机必须具备倾转机故障模式下的安全运行能力<sup>[36]</sup>。在飞机模式下,由于短舱与地面间隙较小,当短舱处于飞机模式时,倾转旋翼机无法安全着陆。为了防止倾转系统完全失效,必须采用多余度设计技术。V-22采用三余度液压螺杆作动系统(HSDS)。在常规操作下,V-22使用位于机翼末端的两个液压螺杆作动器。如果这些液压系统中的一个或两个出现故障,作动器末端备份的电倾转系统将继续为短舱提供动力。如果冗余系统发生故障,飞机仍然可以在固定翼模式下以最小的损失进行着陆。

与直升机相似,倾转旋翼机在完全失去动力的情况下也应具备安全着陆能力。中国民用航空规章CCAR-29-R2第143条要求<sup>[34]</sup>,当发动机失效发生在最大连续功率和临界重量时,旋翼航空器在申请合格审定的速度—高度包限范围内,必须是可操纵的。拟定的PART XX<sup>[37]</sup>也要求垂直升力类飞行器,当发动机全部失去动力后,应能够保持控制,并在应急着陆时根据需要改变航空器的构型或状态。如果民用倾转旋翼机在飞行时遇到完全动力失效的情况,一般会通过无动力滑翔下降到附近机场进行紧急着陆,类似于传统的民用运输机。为确保民用倾转旋翼机的安全性,也必须按照CCAR-29规定的无动力状态下的自转下滑程序开展飞行验证。

除了发动机故障外,由于关键部件较多,倾转旋翼系统也易发生关键失效模式。在飞行过程中,单发失效概率一般介于 $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$ ,其他动部件的故障率约为 $10^{-6}$ 。为了将失效概率提升到与飞行控制系统相近的水平,需要开展关键部件失效安全性提升技术研究,如采用健康监测系统,提升

传动系统精密部件(齿轮、轴承等)的工艺制造水平,以及高容错设计技术<sup>[38-39]</sup>等。

## 4 结束语

随着科技发展以及人民生活水平的提高,未来民用市场将更加强调“高速直达”与“随时起降”。民用倾转旋翼机上承支线客机、下接直升机,能够以“点到点”的方式高效实施直接救援或开展相关作业,可以满足我国海洋搜救、客货运输、海洋开发、干支通交通运输等远航程、快响应、大载重等任务需求。基于上述应用场景,短期内,航空应急救援体系建设的迫切性催生了我国民用倾转旋翼机的市场需求;中长期来看,我国交通运输体系的末端短途运输网络建设,将成为推动民用倾转旋翼机市场发展的重要推动力。

纵观XV-15技术验证机和V-22倾转旋翼机事故,其原因主要是系统的可靠性低,与倾转旋翼机的构型特征没有直接相关性。欧美国家通过系统可靠性提升、多余度设计等措施,实现了V-22和AW609等军民用倾转旋翼机的成功研制。对于民用倾转旋翼机,适航要求高于军机,必须通过设计手段和严苛的适航认定程序保障其使用安全性。因此,本文认为与倾转旋翼机安全性相关的关键技术和各种故障模式下的安全性设计技术,应作为我国民用倾转旋翼机工程化研制的重点研究方向。

AST

## 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. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] Matt B, Jim S, Ken W, et al. Advanced vehicle concepts and implications for NextGen[R]. NASA/CR-2010-216397, 2010.
- [4] John R, Matthew O, Christopher M, et al. Technology needs for high-speed rotorcraft[R]. NASA Contractor Report, 1991.
- [5] John P B, Senay S. Air traffic flow management in the

- presence of uncertainty[C]// Proceedings of the 2009 USA/Europe Air Traffic Research and Development Seminar, 2009: 571-581.
- [6] Thompson P, Neir R, Reber R, et al. Civil tiltrotor missions and applications, phase II: The commercial passenger market[R]. NASA-CR-177576, 1991.
- [7] Yeo H, Johnson W. Performance and design investigation of heavy lift tiltrotor with aerodynamic interference effects[J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(4):1231-1239.
- [8] Lebacqz J V, Scott B C. Ground-simulation investigation of VTOL airworthiness criteria for terminal-area operations[J]. Journal of Guidance, 1985, 8(6):761-767.
- [9] Johnson W, Yamauchi G K, Watts M E. NASA heavy lift rotorcraft systems investigation[R]. NASA/TP-2005-213467, 2005.
- [10] Acree C W, Hyeonsoo Y, Sinsay J D. Performance optimization of the NASA large civil tiltrotor[R]. NASA/TM-2008-215359, 2008.
- [11] Young L A, Chung W W, Paris A, et al. A study of civil tiltrotor aircraft in NextGen airspace[C]. 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, 2010: 595-612.
- [12] 吴希明, 张广林, 牟晓伟. 中国直升机产业的现状及发展建议[J]. 航空科学技术, 2021, 32(1):3-9.  
Wu Ximing, Zhang Guanglin, Mu Xiaowei. China helicopter industry status and development proposal[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1):3-9. (in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 杨玉腾, 李治权, 冷俊杰. 基于任务需求的高速旋翼机多方案对比研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(5):7-13.  
Yang Yuteng, Li Zhiquan, Leng Junjie. Comparative study on multi-plan of high-speed rotorcraft based on mission requirements[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(5):7-13. (in Chinese)
- [15] 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 tiltrotor aircraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2900-2912. (in Chinese)
- [16] 靳鹏, 樊枫. 直升机机身干扰对旋翼气动与噪声特性影响研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(6):9-20.  
Jin Peng, Fan Feng. Study on the interaction influence of helicopter fuselage on the rotor aerodynamics and aeroacoustics [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(6):9-20. (in Chinese)
- [17] 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, 2023, 38(8):1889-1900.  
Yu Xin, Chen Renliang. Effect of tiltrotor nacelle tilting strategy on the pilot workload[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8):1889-1900. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] 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. (in Chinese)
- [20] 王燕鹏, 韩涛, 陈芳. 融合文献知识聚类和复杂网络的关键技术识别方法研究[J]. 图书情报工作, 2020, 64(16): 105-113.  
Wang Yanpeng, Han Tao, Chen Fang. Identification of key technologies based on literature knowledge clustering and complex network[J]. Library Information Service, 2020, 64(16): 105-113. (in Chinese)
- [21] 刘静怡, 闫涛, 李文辉. 倾转旋翼无人机关键技术研究综述[J]. 国际航空航天科学, 2022, 10(4): 99-107.  
Liu Jingyi, Yan Tao, Li Wenhui. Overview of key technologies for tiltrotor UAV[J]. Journal of Aerospace Science and Technology, 2022, 10(4): 99-107. (in Chinese)
- [22] 蔡婧, 蔡汝鸿. V-22“鱼鹰”倾转旋翼机研制历程与关键技术[J]. 航空科学技术, 2013(3):11-14.

- Cai Jing, Cai Ruhong. Development process and key technologies of the V-22 "Osprey" tiltrotor aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2013(3):11-14. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. "十四五"国家应急体系规划 [EB/OL]. (2022-03-25). [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/202203/t20220325\\_1320218.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/202203/t20220325_1320218.html). National Development and Reform Commission. "14th Five-year plan" national emergency system planning [EB/OL]. (2022-03-25). [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/202203/t20220325\\_1320218.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/202203/t20220325_1320218.html).(in Chinese)
- [24] 中国民用航空局,国家发展和改革委员会,交通运输部. "十四五"民用航空发展规划[EB/OL].(2021-12-14). [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content\\_5667003.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content_5667003.htm). Civil Aviation Administration of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Transport of the People's Republic of China. "14th Five-year plan" civil aviation development planning [EB/OL].(2021-12-14).[http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content\\_5667003.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content_5667003.htm).(in Chinese)
- [25] Maisel M, Giulianetti D, Dugan D. The history of the XV-15 tiltrotor research aircraft from concept to flight[R]. NASA SP-2000-4517, 2000.
- [26] Gertler J. V-22 Osprey tiltrotor aircraft: Background and issues for congress[R].Library of Congress Washington DC Congressional Research Service, 2009.
- [27] 王钟强.AW609 艰难前行:民用倾转旋翼飞机问世有多难?[J].*航空世界*, 2016 (2):8-17.  
Wang Zhongqiang. AW609 struggles ahead:How hard is it for civil tiltrotor?[J]. *Aviation World*, 2016(2):8-17. (in Chinese)
- [28] Chasseur J, Michael B, Ye Zhibin. The V-22 Osprey program: Challenges in design and implementation [EB/OL]. (2020-06-01). [https://issuu.com/michiganjournalofpublicaffairs/docs/mjpa-vol.-17\\_1\\_/s/12396372](https://issuu.com/michiganjournalofpublicaffairs/docs/mjpa-vol.-17_1_/s/12396372).
- [29] Leishman G. Rotorcraft aeromechanics-getting through the dip [C].AHS Specialists Conference on Aerodynamics,2008:9-34.
- [30] RTCA. Software considerations in airborne systems and equipment certification[EB/OL]. (2012-01-05). <https://www.rtca.org/training/do-178c-training/>.
- [31] Dominique B, Christian F, Pascal T. Electrical flight controls, from airbus A320/330/340 to future military transport aircraft: A family of fault-tolerant systems[J]. *Microprocessors and Microsystems*,1995,19(2):75-82.
- [32] 赖水清,严峰,徐珂. 倾转旋翼机过渡飞行阶段控制律设计研究[J].*直升机技术*, 2009(3):52-55.  
Lai Shuiqing, Yan Feng, Xu Ke. Design and research of control law for tiltrotor in transition flight phase[J]. *Helicopter Technique*, 2009(3):52-55.(in Chinese)
- [33] Sun S, De Visser C C. Quadrotor safe flight envelop prediction in the high-speed regime: A monte-carlo approach[C]. *AIAA SciTech Forum*,2019:1-12.
- [34] 张波,吴雄,卜振鹏,等. 倾转旋翼机推进系统特点及关键技术分析[J].*舰船电子工程*, 2022, 42(8): 4-7.  
Zhang Bo, Wu Xiong, Bu Zhenpeng, et al. Analysis on the characteristics and key technology of propulsion system of the tiltrotor aircraft[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(8): 4-7.(in Chinese)
- [35] Kilmain C J, Murray R, Huffman C. V-22 drive system description and design technologies [C]//Presented at the American Helicopter Society 51st Annual Forum, 1995: 1384-1403.
- [36] 中国民用航空局. 中国民用航空规章 第29部 运输类旋翼航空器适航规定[EB/OL].(2015-12-09).<http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201512/P020151209533378359951.pdf>. Civil Aviation Administration of China. China civil aviation regulations, part 29: Airworthiness regulations of transport rotorcraft. [EB/OL]. (2015-12-09) .<http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201512/P020151209533378359951.pdf>.(in Chinese)
- [37] PART XX. Interim airworthiness criteria for powered-lift transport category aircraft[S].FAA, 1988.
- [38] Zhang Zhiqing, Yang Pu, Hu Xukai, et al. Sliding mode prediction fault-tolerant control of a quad-rotor system with multi-delays based on ICAO[J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2021, 17(1):49-65.
- [39] Cheng Xin. Design and implementation of a fault-tolerant magnetic bearing control system combined with a novel fault-diagnosis of actuators[J]. *IEEE Access*, 2021(1): 2454-2465.

## Application Requirements and Key Technologies Analysis for Civil Tiltrotor Aircraft

Lyu Lefeng, Wu Ximing, Li Yinghui

*Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China*

**Abstract:** Tiltrotor is suitable for civil aviation mission scenarios in China and is the key development direction of civil helicopters in the future. This paper analyzes the application requirements of civil tiltrotor aircraft in emergency rescue, transportation and general aviation, as well as the macro development environment analysis. The development experience and traceability analysis of typical tiltrotor aircraft such as XV-15 and V-22 was studied. The identification of key technical elements of civil tiltrotor aircraft was carried out from the perspective of safety and airworthiness. Key technologies such as flight control system, transmission system, failure mode and safety design were analyzed. The research results of this paper will be beneficial to support the engineering development of civil tiltrotor aircraft in China.

**Key Words:** civil tiltrotor aircraft; application requirements; key technologies; airworthiness safety