

文章编号:1674-8190(2022)04-001-10

支线货运无人机的发展现状、运行方式与关键技术分析

许建华¹, 李权²

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 北京中航智科技有限公司, 北京 100176)

摘要: 支线货运无人机为偏远地区、山地、高原、海岛和城市快捷货运等提供了一种更经济、更高效的物资运输方式,并在应急救援和前线补给中发挥着重要作用。本文回顾了支线货运无人机的国内外发展现状,对比了支线货运无人机与有人机、陆地交通之间的竞争优势,论述了当前技术条件下支线货运无人机相对安全的运行方式——点对点管道飞行,并分析了支线货运无人机需要解决的关键技术,包括适航技术、飞行器平台技术、智能控制技术、数据链路技术、导航技术和自主起降技术等。支线货运无人机的广泛应用需要开展体系性建设工作,重视运行风险,除平台研制外,还必须关注法律法规、空域管理、飞行管理、机场设施等方面的工作。

关键词: 无人机; 支线货运; 运输机

中图分类号: V279; V353

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.04.01

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development, Running Mode and Key Technologies Analysis of Regional Cargo Drones

XU Jianhua¹, LI Quan²

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

(2. Beijing Zhonghangzhi Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: Regional cargo drones provide a more economical and efficient transportation mode for freight in remote areas, mountains, plateaus, islands and cities, and play an important role in emergency rescue and supplies at war-times. In this paper the development of regional cargo drones is reviewed, the competitive advantages between regional cargo drones, human aircraft, and land traffics are compared, and the relatively safe running mode of cargo drones under the current technical status is discussed, which is "the pipeline flight of point to point". Finally, key technologies of regional cargo drones are analyzed, including the technology of airworthiness, aircraft platforms, datalink, navigation and autonomous take-off and landing technology and so on. The application of regional cargo drones need to carry out systematic construction, pay close attention to operational risk, laws and regulations for UAVs, airspace management, flight management, airport facilities and other construction work, in addition of aircraft platforms.

Key words: drones; cargo drones; transport

收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-12-07

通信作者: 李权, lq0309@163.com

引用格式: 许建华, 李权. 支线货运无人机的发展现状、运行方式与关键技术分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(4): 1-10.

XU Jianhua, LI Quan. Development, running mode and key technologies analysis of regional cargo drones[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 1-10. (in Chinese)

0 引言

近年来,基于对未来无人运输机广阔应用场景和巨大经济效益的乐观预测,国内外众多科研机构和公司纷纷提出了无人运输机发展规划。其中,支线货运无人机将用于连接中心城市与偏远县乡,实现低成本快捷货运,还可在陆路交通不便的山地、高原和海岛地区方便部署,可成为建设“交通强国”的重要一环。支线货运无人机被认为是未来三级航空货运体系(干线有人货运机+支线无人货运机+末端小型配送无人机)的关键组成部分,最有希望实现无人化快捷运输,不仅能显著提高物流效率,还可扩展广阔县乡级物流市场^[1-3]。

全球著名市场研究机构 Markets and Markets 于 2019 年 1 月发布的《全球无人机物流和运输市场》报告中预计全球物流无人机市场将在 2022 年达到 112 亿美元,到 2027 年将增长到 290.6 亿美元,预测期内的复合年均增长率为 21.01%,并预计亚太地区将引领无人机物流和运输市场^[4]。保守测算,未来十年中国大陆平均每个行政县部署 1 架支线货运无人机,用于构建端到端的便捷支线货运系统,则整个中国大陆地区就需要采购 3 000 余架这类无人机,直接经济产值超过 500 亿元人民币。

本文对近年来国内外开展的支线货运无人机研制和技术研究情况进行回顾和总结,分析支线货运无人机的核心应用场景、运行方式、主要竞争优势以及面临的困难,重点探讨支线货运无人机大规模商用需要解决的关键技术,并给出建议。

1 国内外发展现状

1.1 美国

美国军工巨头洛克·马丁公司和卡曼公司于 2012 年合作推出了著名的 K-MAX 无人货运直升机,如图 1 所示。该机采用双旋翼动力布局,最大载荷 2.7 t,航程 500 km,全自动 GPS 制导,无需跑道,环境适应性强,可在夜间、山地和高原区执行战场运输任务。该机在阿富汗战争期间累计执行任务 485 次,飞行时间 500 多小时,累计转运货物

720 t,是美军地面分队在复杂地形条件下实现快速推进和撤退的重要支援力量,向世界展示了货运无人机的军事潜力^[5-8]。



图 1 K-MAX 无人直升机^[5]

Fig. 1 K-MAX unmanned aerial vehicle^[5]

美国加州的 SabreWing 公司于 2019 年推出了具备垂直起降能力、类似飞行汽车的无人运输机“Rhaegal-A”,应用场景定位为战场伤兵转移。同年,YEC 电动航空公司推出了由三合板制造、一次性使用的无动力滑翔飞行的货运无人机 Silent Arrow GD-2000(如图 2 所示),配置 3.96 m³货舱,载重 567 kg,飞行距离 58 km,用于向前线投送救生物品、药品和装备等^[9]。



图 2 Silent Arrow GD-2000 无人机^[9]

Fig. 2 Silent Arrow GD-2000 UAV^[9]

民用领域,美国贝尔公司在 2019 年推出了垂直起降货运飞机 APT,其采用尾撑多旋翼布局,最大载重 500 kg,最大飞行时速 160 km,用于向偏远地区运输紧急医疗物资,其缩比验证机 APT 70 于 2020 年 7 月完成了首次视距外试飞。Xwing 公司采用自主集中飞控系统将 Cessna208B 改造为无人运输机,并于 2020 年 8 月完成试飞,正在开展适航取证工作。传统物流公司如美国的亚马逊、UPS、美国邮政等均提出了无人机发展计划,但主要集中在末端配送领域。如亚马逊的“空中仓库”,UPS 的“卡车+无人机”送货模式等。

目前,美国货运无人机在军事领域已得到应用,而民用领域应用相对落后,主要原因是民用无

无人机的成熟应用不仅需要智能安全的飞行平台,还需要一系列完善的法律、法规、空域管理体系支持。所幸,美国航空航天管理机构也认识到了这一点,正积极制定政策促进民用货运无人机的发展。美国联邦航空管理局(FAA)2018年启动了无人机融合空域试点计划,目标是安全地将无人机系统融入到美国国家空域系统,已经发布了200多个设施地图开展探索演示,并简化了商业无人机授权过程。2020年6月,美国FAA发布了首版无人机系统(UAM)城市空中交通概念方案,提出“从易到难,逐步实施”的总体发展路线,在保证安全的同时,实现在国家空域系统中运行大量城市空中交通飞行器^[10-11]。

1.2 欧 盟

德国物流公司DHL于2014年10月就开展了使用无人机进行包裹运送的演示验证工作。西班牙Singular Aircraft公司2017年就研制并批量生产了大型水陆两栖无人运输机Flyox Mark I(如图3所示),该机载重1.95 t,巡航速度233 km/h,由地面站控制并具备自主飞行模式,但限于欧洲法规,该机实际交付非洲的肯尼亚和卢旺达使用^[12]。



图3 Flyox Mark I 两栖无人机^[12]
Fig. 3 Flyox Mark I amphibious UAV^[12]

德国Volocopter公司于2019年10月成功试飞了VoloDrone物流无人机(如图4所示),其采用电动多旋翼动力系统,旋翼直径9.2 m,机高2.3 m,最高时速40 km,最大装载200 kg,挂载区尺寸与欧洲包装尺寸兼容,可为农业、物流、公共服务等提供运输服务^[13]。斯洛文尼亚Pipistrel公司和美国霍尼韦尔公司合作推出了Nuuva V300大型电动货运无人机(如图5所示),该机采用串联机翼+升降旋翼布局,利用8副电动旋翼进行垂直起降,无需跑道,经济巡航速度165 km/h,可以承担300 kg货物300 km的运载任务^[14]。



图4 VoloDrone 物流无人机^[13]
Fig. 4 VoloDrone logistics UAV^[13]



图5 Nuuva V300 物流无人机^[14]
Fig. 5 Nuuva V300 logistics UAV^[14]

此外,英国Windracer公司与南安普敦大学合作研制了大型无人运输机Windracer Ultra,该机采用常规布局和双发活塞动力,载重100 kg,航程1 000 km,具备短距起降能力。2020年新冠肺炎疫情期间,该机被应用到南安普敦和怀特岛之间运送抗疫物资,降低由人传播病毒的风险^[15]。

欧盟各国由于法规不一致,物流无人机运行面临诸多障碍,目前各国正在携手制定统一的无人机运营政策。2016年,欧盟内部启动了“无人机空域蓝图U-Space”项目,该项目提出了从基础服务、初始服务、高级服务到全面服务的一系列规划,促进将无人机运行安全整合到现有空域管理。欧洲多家机构和公司还联合成立了无人货运飞行平台(PUCA)组织,旨在促进无人货运飞机定义、要求和发展,目前已有50多个成员^[11]。

1.3 中 国

中国国内在电商物流蓬勃发展的驱动下,货运无人机研制热情高涨。中国邮政、京东、顺丰等公司都相继开展了货运无人机的研制和运营体系建设工作。由于支线货运无人机与现有通用飞机在飞行器平台、货运体系等多个方面存在良好的通用性,将轻型运输飞机进行无人化改造无疑是一条研发捷径。航天时代飞鹏有限公司、四川省天域航通科技有限公司和航空工业通用飞机有限责任公司等分别将采用活塞动力的运-5飞机改造

为货运无人机。朗星无人机系统有限公司将 P-750XL 涡桨通用飞机改造为 AT200 支线货运无人机。航空工业第一飞机设计研究院将小鹰 500 飞机改造为“探路者”无人机。

此外,国内新研的货运无人机也在积极发展中。西安京东天鸿科技有限公司基于物流需求场景,自筹资金研制了京鸿无人运输机(如图 6 所示),并完成了试飞测试。上海峰飞航空科技有限公司研制了大型电动垂直起降无人货运飞机 V400(如图 7 所示),该机采用电动复合翼布局,依靠 8 副旋翼实现垂直起降,最大起飞质量 400 kg,电动版航程 300 km,于 2021 年 8 月完成上海至舟山往返 200 km 演示飞行^[16]。相对有人机改造,新研无人机可更好地针对无人货运场景需求设计,比如采用兼容性更好的货舱设计、自动维护系统设计等。由于不需要有人机的驾驶舱、增压舱、生命保障和救生系统等,无人运输机的制造和维护成本比有人机更低,且运行效率更高,更具市场竞争力。



图 6 京东物流无人机^[11]
Fig. 6 Jingdong logistics UAV^[11]



图 7 峰飞 V400 物流无人机^[16]
Fig. 7 Fengfei V400 logistics UAV^[16]

政策方面,我国各级政府近年来积极促进和推动货运无人机产业落地和发展。《交通强国纲要》中强调“积极发展无人机(车)物流递送”。《中国制造 2025》规划要求推进无人机产业快速发展。《关于促进和规范民用无人机制造业发展的指导意见》指出“加快民用无人机行业应用基础设施、服务和保障体系建设”,推进民用无人机在物流快递、应急救援等行业的创新应用。中国民用航空局提出了“基于运行风险”的无人机适航审定总体思想,组织建立了我国自主的无人机适航标准体

系。2020 年 1 月,中国民用航空局发布了《高风险货运固定翼无人机系统适航标准(试行)》,指导货运无人机系统的适航取证工作^[17]。西安京东天鸿科技有限公司 2018 年 2 月获得中国民用航空西北地区管理局授牌“陕西省无人机物流多式联运创新试点”,并授权在陕西开展无人机物流商业应用试点。江西丰羽顺途科技有限公司 2018 年 3 月获得中国民用航空华东地区管理局颁发的全国第一张无人机航空运营(试点)许可证,许可在指定空域内进行商业化运营。

目前,京东集团股份有限公司(以下简称京东公司)和顺丰控股股份有限公司(以下简称顺丰公司)正在国内着手布局无人机运输网络,在支线级和末端配送级探索无人机运输。典型应用如采用无人机将四川甘孜的新鲜松茸运出山,然后再由飞机运往全国重要城市,解决高价值农产品保鲜销售的难题。2020 年新冠肺炎疫情期间,京东公司和顺丰公司利用无人机非接触特点,采用无人机为医院和隔离区运送抗疫物资。据顺丰公司数据:疫情期间采用无人机在湖北包括武汉在内的 5 个城市,32 天运输了 11 t 物资,飞行超过 3 000 架次,飞行里程超过 13 000 km^[18]。

1.4 其他国家和地区

以色列在无人机领域拥有完善的技术和丰富的使用经验。以色列城市航空公司(Urban Aeronautics)研制了大载重垂直起降无人运输机“空中骡子”(Airmule)(如图 8 所示),2013 年实现首飞。“空中骡子”无人机的出口型命名为“鸬鹚”无人机。该机构型奇特,机身装备 2 个平行于地面的涵道风扇实现垂直起降,尾部安装了 2 个推进涵道风扇实现前飞推进,最大飞行质量 1.4 t,速度 180 km/h,可在 50 km 半径内每架次运送 500 kg 货物,24 h 内完成 6 000 kg 货物转运,主要用于短途运输、前线补给和战场伤员运输^[19]。



图 8 以色列“空中骡子”无人机^[19]
Fig. 8 Airmule UAV of Israel^[19]

俄罗斯技术公司2015年推出了“水鸭”两栖多用途无人机,该无人机最大起飞质量达2 000 kg,飞行高度可达6 000 m,单次航程约2 500 km,飞行最高速度300 km/h,兼顾运输、侦察和火力打击能力。

非洲地区由于基建落后,地面交通不发达,反而为无人机运营提供了舞台。美国Zipline公司于2016年研制了一款小型无人运输机,用于向卢旺达的偏远医院和农村诊所运送血液和药物,已经

执行了1 400余次运输任务,其中25%属于紧急交付。肯尼亚星空航空(Astral Aviation)于2017年1月开始应用西班牙Singular Aircraft公司研制的Flyox Mark I无人货机进行运输,其开发的“无人机管理系统”(UTM)获得了2017年国际航空运输协会(IATA)的运输创新奖。

综上所述,当前全球主要的大型货运无人机如表1所示。相比有人运输机,货运无人机的吨位还比较小,仍处于探索阶段。

表1 大型货运无人机项目一览
Table 1 List of large cargo drone projects

序号	项目	设计特征	应用场景	年份	公司	国别
1	K-MAX	无人直升机,异轴双旋翼布局,最大载荷2.7 t,航程500 km。	山地、高原地区的军事运输	2012	洛马与卡曼公司联合	美国
2	APT	多旋翼布局,最大载重500 kg,最大飞行时速160 km。	偏远地区的紧急医疗物资运输	2019	贝尔	美国
3	Silent Arrow GD-2000	三合板制造、无动力滑翔飞行、一次性使用,3.96 m ³ 货舱,载重567 kg,飞行距离58 km。	向前线投送救生物品、药品和装备等	2019	YEC	美国
4	Nuuva V300	串列翼+升降旋翼布局,8副电动旋翼垂直起降,300 kg,300 km的运载任务。	小型自动货运和城市空运	2020	Pipistrel	斯洛文尼亚
5	Xwing	Cessna208B改造,常规布局,单发涡桨动力,最大载重2 t,最大巡航速度341 km/h,最大航程1 680 km。	支线货运	2020	Xwing	美国
6	Flyox	大型水陆两栖无人运输机,最大载重1.95 t,巡航速度233 km/h,巡航时间7 h。	货运、救援、消防、监控	2017	Singular Aircraft	西班牙
7	FH-98	运-5B飞机改造,单发活塞动力,载重1.5 t,航程1 500 km,巡航速度180 km/h。	支线货运	2018	航天时代飞鹏有限公司	中国
8	AT200	P-750XL飞机改造,单发涡桨动力、载重1.5 t,航程2 183 km,巡航速度313 km/h。	支线货运	2018	朗星无人机系统有限公司	中国
9	空中骡子/鸬鹚	涡轮轴动力,垂直起降,可在50 km半径内每架次运送500 kg货物。	短途运输、前线补给和战场伤员运输	2013	以色列城市航空公司	以色列

2 竞争优势

2.1 与有人机对比

无人机相对有人机的主要优势在于执行“单调、肮脏、危险”任务时表现的高可靠性、高安全性、低成本以及高效率^[20]。具体到物流场景,支线货运无人机相对有人货运飞机的优势如下:

(1) 不需要座舱、增压舱及生命保障系统,降低了制造和维护成本,节省机舱空间,减轻重量;

(2) 可连续高效地从事枯燥乏味的运输工作,出勤率高,经济性好;

(3) 无驾驶员,维护简单,使用成本低,随着智能化水平的提高,使用成本还将进一步降低;

(4) 无人驾驶,不受飞行员数量限制,可大量装备,快速形成运力;

(5) 可深入山地、高原高寒、复杂气象等恶劣环境地区,从事常态化运输作业,降低生命损失风险;

(6) 可进入高风险、高威胁环境执行支援补给任务,减少高价值有人机和飞行员损失;

(7) 可深入有人机难以进入的核生化污染区,从事运输、救援、采样和灾难评估等工作。

2.2 与陆地运输对比

支线货运无人机相对陆地运输的比较优势如下:

(1) 货运无人机能克服地形限制,深入公路不便和铁路不达的区域,如边陲基地、偏远县乡等;

(2) 对于作业航程 500~800 km 的支线市场,载重 2 t 以内,货运无人机运输相对陆地运输在时效性和经济性方面更具优势,更适宜偏远地区的物流市场;

(3) 支线货运无人机运行体系的部署和维护成本远低于同航段的公路和铁路运输系统,一般通用机场或简易跑道就可满足起降要求,建设周期短,选址灵活,绝大多数县级区域都具备建设和运营条件;

(4) 小批量高价值货物(如救援药品、电子芯片、商业快件)在重要城市间的点对点运输,货运无人机运输更高效,是陆地运输的重要补充。

3 运行方式

支线货运无人机投入使用首要解决的是运营安全性问题,其次是成本控制问题。无人机运行风险主要源于 3 个方面:(1) 内部系统或设备故障,比如导航设备故障、空速管故障、发动机故障等;(2) 遭遇突发意外,比如结冰、障碍物、鸟撞等;(3) 受到外部干扰,比如导航欺骗、电磁干扰、链路劫持等。按照目前无人机的技术成熟度,以上风险还不能完全解决,飞控系统也无法达到人的智能化水平,目前的货运无人机实际上还只是具有一定自动飞行能力的远程控制飞行器^[21-22]。因此,支线货运无人机相对安全的运行方式是在远离人口密集区建立“点对点的管道飞行”体系,全程监督,严格限制无人机的活动范围。未来随着自主飞控技术或智能技术的进步,经严格审定后,再考虑放宽限制。

“点对点的管道飞行”运行方式具体如下:

(1) 运营中心和空管部门充分论证,确定货运无人机部署的机场端点和点到点之间的飞行管道

(空域),确定管道的空间范围和运行时间等,无人机一般只允许在管道内飞行;

(2) 为应对故障情况,管道沿线每隔一定距离(如 50 km)设置备降点或安全区;

(3) 为保障飞行过程中导航和数据链路的稳定和安全,除采用卫星外,每隔一定距离需要设置地面基站作为补充;

(4) 每个端点机场布置 2~3 名地勤人员,由地勤人员负责完成飞机的装卸和起飞/着陆前的检查,将飞机推入或推出跑道,引导飞机自主起降;

(5) 在航路段,飞机正常按预定航线飞行,能够智能探测意外情况(如遭遇障碍物、飞机故障、结冰、强风等)并报告飞管中心,根据指令或自主作出调整;

(6) 地面飞管中心在整个飞行过程中不间断地进行飞行监控,保持“人在回路上”的干预机制,及时发现异常并给飞机下达指令;

(7) 地面中心对潜在的运行风险充分评估,制定应急措施。

4 关键技术

4.1 支线货运无人机适航体系和支撑技术

尽管各国适航机构都在积极推动支线货运无人机的适航取证工作,但是支线货运无人机满足适航规范的很多技术障碍仍未清除。传统商用航空器依靠飞行员进行飞行控制和安全决策,无人机因为人在控制环路外,操作手不能按照第一感官对飞机进行判断和操作,主要依靠自动飞行控制系统进行飞行。而自动飞行控制系统则可能面临导航失灵、数据链中断和被劫持、遭遇极端天气等复杂意外情况。无人机虽然机上无人,但这些意外均有可能导致飞机失控进而对外部环境造成毁伤,导致灾难性事件发生。按照适航精神,无论有人机还是无人机,都必须坚决避免灾难性事件发生,不能满足这一要求,也就不具备规模化商用运营前提。

大型无人机由于机上无人的典型特征,传统针对乘员安全的相关适航条款要求降低了,但针对系统安全的条款及相应适航技术体系却更加复杂了。中国民用航空局 2020 年 1 月发布了《高风险货运固定翼无人机系统适航标准(试行)》^[17],一定程度上放宽了单机适航取证的复杂性,便于现

阶段企业开展探索工作,但实际商业化规模运行还有很长的道路要走。对于大型无人机商用化运行,欧美适航当局表现得较为审慎,不仅考虑单机适航认证,而且从全系统出发,开展严格的风险评估,制定系统性策略以防范风险发生^[21-22]。目前,国内尽管一些地方开展货运无人机的试运行,但是飞行控制逻辑、风险预防策略和相关技术措施还不能证明其完全具备预防灾难性事件发生的能力。监管部门应严把风险管控,引导企业规范发展,完善无人机适航技术体系和安全运行法律法规,促进无人机积极向全系统安全性设计逼近^[23-24]。

4.2 飞行器平台创新技术

“绿色航空”是现代民用航空技术发展的主流趋势之一。由全球航空运输业组织和公司组成的世界航空运输行动小组(Air Transport Action Group,简称 ATAG)于2020年9月发布了全球航空业应对气候变化的2050路线图报告,目标到2050年全球航空业二氧化碳排放量比2005年减少一半,到2060年左右达到净零碳排放^[25]。欧美各国凭借技术优势,也会制定更严苛的碳排放限制指标。届时不满足碳排放指标的飞行器将不得不退出民航市场。支线货运无人机未来必然与其他航空器一样,将面临节能、减排、降噪等强制性指标约束。

未雨绸缪,支线货运无人机的发展需要采用先进的飞行平台创新技术,实现减排、降噪等绿色航空目标。电动航空器或氢燃料航空器在运行期间无排放,具备低成本、低噪声的优势,未来将成为支线货运航空器的主要形式。美国电动机制造商Magnix将Cessna 208飞机改造为电动飞机,已经完成多次飞行测试,正在适航取证^[26-27]。国内辽宁锐翔通用航空公司也研制了“锐翔(RX2X)”双座电动通用飞机,航时达到2.5 h,已经取得适航证^[28]。

随着同级机型增多,市场竞争加剧,无人机若要赢得市场,必须在经济性、便捷性、可靠性和安全性等方面增强优势。这些要求需要先进的飞行器平台技术支持,需要在飞行器总体、气动、结构、强度、材料、工艺、发动机等领域不断取得突破。除了新型电动(新能源)航空技术外,层流技术是

另一个重要发展方向,层流设计可有效提高飞机气动效率,促进实现节能减排目标。美国OTTO Aviation公司的Celera 500L飞机采用全外形层流设计,实现了比相似常规外形减小阻力59%^[29]。

新工艺/新材料技术也是重要的努力方向。实践表明,新型高模量轻质复合材料的应用可显著降低飞机结构重量,已经成为新一代飞行器材料技术发展的重点。对于货运无人机,复合材料用量很可能大幅超出传统飞机,甚至出现全复合材料机身。2021年6月,威海光威复合材料股份有限公司向航空工业第一飞机设计研究院交付了TP500货运无人机全复合材料机身和尾翼^[30]。

4.3 智能控制技术

无人机在运行过程中不可避免地会遇到各种突发意外情况,包括强风、鸟撞、结冰、发动机停车、机载系统故障、通信中断、导航丢失等。无人机安全运行必须解决所有可能意外下的飞机控制和决策问题。有人机由驾驶员对飞机实现全权限实时操控;无人机飞行中主要依靠自动飞行控制系统进行控制。自动飞控的前端是通过各类传感器识别飞机状态,依赖于传感器和分析算法的效能;决策端依靠机载计算机,取决于机载计算机性能和飞行控制算法水平;执行端主要依靠各类作动机构。自动飞行控制技术的核心集中在前端和决策端,即传感器技术、机载计算机技术和飞行控制算法。自动飞控的发展方向是智能控制,实现无人机由自动控制飞行向自主决策飞行发展。无人机自主飞行需要的复杂避障能力、多机协同能力、路径规划能力、自主起降能力等都取决于未来智能控制技术的发展水平。在越复杂的环境下执行任务,要求飞机的智能化水平越高、自主决策能力越强。智能控制技术正在汽车自动驾驶领域积极推进,以目前技术能力而言,还满足不了安全运行要求。短期内无人机飞行还是主要依赖于人在回路上的自动控制策略,为确保飞行安全,大型无人机在飞控系统设计时必须避免因单点失效导致系统性风险的发生。影响飞行安全的关键系统和设备必须采取可靠性或冗余度设计策略,这与一般的单冗余小无人机系统框架不同^[31-33]。

4.4 数据链路技术

支线货运无人机远距离执行任务,必须保证数据链路的稳定性和安全性。数据链路不管采用卫星通信还是地面基站传输,实质都是微波通信,其存在信号遮蔽、干扰、欺骗等问题,特别是在山区和战区。采用冗余配置和信息加密是保证数据链路稳定安全和稳健的一种方法。

无人机运行中需要不断上行/下行数据,某些特殊任务需要传输的数据类型多、数据量特别大。这样,数据链路系统就需要保障高通量大宽带的数据传输,并且保证满足任务要求的低延迟。5G通信和卫星互联网技术为无人机高通量数据传输提供了解决之道。但5G通信存在传输距离限制,不适合大范围区域推广。马斯克的“星链”卫星互联网最近取得了突破性进展,2021年第二季度在美国的平均上传速度为13.89 Mbps,在加拿大的平均下载速度为115.22 Mbps,延迟仅为45 ms,几乎与固定宽带速度一样快,理论上已经解决了无人机需要的高通量数据传输问题^[34],但数据传输的稳定性和安全性仍面临很多挑战,特别是要防止链路被入侵截获和干扰。欧盟在U-Space项目中还设计了一种结合蜂窝网络和卫星网络的混合架构,确保使用U-Space服务的无人机可靠和安全运行^[35]。

数据链路还包括周围大量运行的无人机之间、无人机与有人机之间、无人机与其他设备之间的通信和信息共享。通过与周围设备的互通互联,共享数据,提高无人机全域态势感知能力。支持智能控制系统高效决策,是未来无人机通信链路和信息系统的的发展趋势之一。而这些设备如何互联互通,数据如何共享传输将由货运无人机运行体系的指挥管理系统和空中交通管理系统共同定义。

4.5 导航技术

导航系统是无人机最重要的机载系统之一,其为无人机提供方位、高度、速度和时间等信息,是实现无人机远程飞行、异地起降、多机协同等能力的重要保障。支线货运无人机飞行路径远,为保证导航定位的准确性,一般采用卫星导航和惯性导航结合的组合导航方式。主导航系统需要采用冗余配置,提高系统的可靠性。

此外,从安全角度,支线货运无人机导航系统应具备防欺骗、电子围栏等能力,确保飞机运行在规定的区域和航段。因此,货运无人机导航系统还应配置基于地面基站的无线电导航定位方式,个别地区甚至需配置基于人工智能的地形(图像)匹配导航定位方式,对主导航系统进行检查或修正,确保导航定位万无一失。当主导航系统完全失灵,无人机可借助磁航向、空速、地形匹配、路径记录等信息,采用航路推算方式进行路径规划,具备原路返程或在指定机场备降的能力^[36]。

4.6 自主起降技术

自主起降能力是货运无人机走向大规模应用的重要基础。通过自主起降技术,地面人员只需清理出跑道并进行必要引导,飞机便可自主完成起降操纵,无需额外配置无人机飞手,这在很大程度上降低了对地面人员的技能要求,使无人机具备大范围的适应能力。美国海军在K-MAX无人直升机项目中,支持开发自主空中货运/多用途系统(AACUS),该系统在动态作战(敌对)和各种天气条件下,无论白天和黑夜,均能自主导航找到简易着陆地点并降落,无需地面控制员帮助^[6]。

5 结束语与建议

当前支线货运无人机取得了可喜发展,在不少地区进入了演示验证阶段,但大规模商业应用依然面临很多问题。除技术层面不断攻关,支持无人机发展的法律法规、各项技术和管理系统也在完善之中,而最终应用效果需待市场检验。对于支线货运无人机研制和发展有以下建议:

(1) 支线货运无人机发展离不开运行体系支持,包括相关法律法规、空域划分、飞行管理系统、机场设施等,而这些需要政府部门和监管机构统一组织、协调、规划并开展运行体系建设。

(2) 积极推动支线货运无人机系统的适航技术体系和规范的建立和完善。当前运行体系下,支线货运无人机的运行风险远远高于常规有人飞机。现有基于风险的适航规范不能完全保证支线货运无人机商业化运营安全,必须从运营全流程、全要素角度全面分析风险因素,制定和完善适航规范和运行体系标准,坚决避免灾难性事件发生。

(3) 无人化运输是物流发展的大趋势,工业部

门应积极布局 and 开展关键技术攻关工作,取得先
发优势,建立行业标准,掌握发展先机。

(4) 无人货运飞机是传统航空制造业与电子
信息化产业深度融合发展的产物,传统航空制造
业是机体,信息化产业赋予其灵魂。无人货运飞
机应用推广需要加快5G通信、卫星互联网、全球
卫星导航系统、人工智能等信息化产业成果的部
署和完善。

参考文献

- [1] 王霞,刘永晋,金伟,等. 物流无人机产业发展的若干思考——2019年新时代区域通用航空业发展高端研讨会专家发言摘编[J]. 河北经贸大学学报(综合版), 2020, 20(1): 74-78.
WANG Xia, LIU Yongjin, JIN Wei, et al. Some thoughts on the development of logistics UAV industry[J]. Journal of Hebei University of Economics and Trade (Comprehensive Edition), 2020, 20(1): 74-78. (in Chinese)
- [2] 周隽. 货运无人机在物流业发展状况分析[J]. 现代经济信息, 2019(24): 340.
ZHOU Cai. Analysis of the development of cargo drones in logistics industry[J]. Modern Economic Information, 2019 (24): 340. (in Chinese)
- [3] 曹允春,张凯迪,付豪,等. 我国大型无人货机发展的探索研究[J]. 中国民用航空, 2018(4): 4.
CAO Yunchun, ZHANG Kaidi, FU Hao, et al. Exploratory research on the development of large unmanned cargo aircraft in China[J]. China Civil Aviation, 2018 (4): 4. (in Chinese)
- [4] Anon. Drone logistics and transportation market, industry analysis & forecast to 2027[EB/OL]. (2018-05-01)[2021-07-20]. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/drone-logistic-transportation-market-132496700.html>.
- [5] Anon. K-MAX unmanned aircraft system [EB/OL]. [2021-07-20]. <https://www.army-technology.com/projects/k-max-unmanned-aircraft-system/>.
- [6] 常刚,张劲锴,刘勇. 外军运输无人机力量建设与启示[J]. 军事交通学院学报, 2019, 21(12): 6-10.
CHANG Gang, ZHANG Shaokai, LIU Yong. Power construction of foreign military transport unmanned aerial vehicles and its enlightenment[J]. Journal of Military Transportation University, 2019, 21(12): 6-10. (in Chinese)
- [7] US Department of Defense. Unmanned aerial vehicles roadmap 2000—2025 [EB/OL]. (2001-04-21)[2021-07-20]. <https://www.fx361.com/page/2019/0909/5518054.shtml>.
- [8] 吕游,侯远达. 运输无人机军事运用研究[J]. 军事交通学院学报, 2020, 22(3): 3-8.
LYU You, HOU Yuanda. Military application of transportation UAV[J]. Journal of Military Transportation University, 2020, 22(3): 3-8. (in Chinese)
- [9] Yates Electrospace Corporation (YEC). Silent arrow cargo delivery drone [EB/OL]. (2019-11-22)[2021-07-20]. <https://www.airforce-technology.com/projects/silent-arrow-cargo-delivery-drone/>.
- [10] FAA. Concept of operations V1.0 [EB/OL]. (2020-06-01)[2021-07-20]. <https://www.doc88.com/p-9903176918714.html>.
- [11] 京东X事业部,京东大数据研究院. 世界物流无人机产业发展年度报告(2017—2018) [EB/OL]. (2018-08-28)[2021-07-20]. https://www.sohu.com/a/251139614_695374.
JD X Business Department, JD Big Data Research Institute. Annual report on the development of the world logistics UAV industry (2017—2018) [EB/OL]. (2018-08-28)[2021-07-20]. https://www.sohu.com/a/251139614_695374. (in Chinese)
- [12] Anon. Singular aircraft, Flyox I, the sky worker[EB/OL]. [2021-07-20]. <https://singularaircraft.com/flyox-i-en/>.
- [13] Volocopter. Volodrone the heavy-lift drone [EB/OL]. [2021-07-20]. <https://www.volocopter.com/solutions/volodrone/>.
- [14] Anon. Pipistrel Nuuva V300 introduction[EB/OL]. [2021-07-20]. <https://evtol.news/pipistrel-cargo-drone/>.
- [15] Windracers. Windracers ULTRA UAV drone to be used to transport medical supplies to support the response to COVID-19 at St Mary's hospital[EB/OL]. (2020-04-24)[2021-07-20]. <http://windracers.org/uav-press-release/>.
- [16] 上海峰飞航空科技有限公司. V400信天翁大载重长航时垂直起降智能飞行器[EB/OL]. [2021-07-20]. <https://x-droners.com/uav/productInfo/20090063>.
Autoflight Company. V400 albatross heavy-duty long endurance vertical takeoff and landing intelligent aircraft [EB/OL]. [2021-07-20]. <https://x-droners.com/uav/product-Info/20090063>. (in Chinese)
- [17] 中国民用航空局航空器适航审定司. 高风险货运固定翼无人机系统适航标准(试行)[S]. 北京: 中国民用航空局航空器适航审定司, 2020.
Aircraft Airworthiness Certification Department of Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard for high-risk cargo fixed wing UAV system (Trial) [S]. Beijing: Aircraft Airworthiness Certification Department, CAAC, 2020. (in Chinese)
- [18] 段昌森. 对疫情背景下无人机物流产业发展的构想[J]. 空运商务, 2020(6): 27-30.
DUAN Changmiao. Ideas for the drone logistics industry development under the background of COVID-19 outbreak [J]. Air Transport & Business, 2020(6): 27-30. (in Chinese)
- [19] Tactical Robotics Ltd. AirMule UAV ambulance [EB/OL]. [2021-07-20]. <https://baike.baidu.com/item/AirMule/19292333?fr=aladdin>.
- [20] EU Commission. European civil UAV roadmap introduction to UAVNET cluster of projects [EB/OL]. [2021-07-20]. <https://www.mendeley.com/catalogue/8815d4fc-9d36-3526-9f83-978d8429c008/>.
- [21] SHAKHATREH H, SAWALMEH A H, AL-FUQAHA

- A, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): a survey on civil applications and key research challenges[J]. IEEE Access, 2019, 7: 48572-48634.
- [22] WACKWITZ K, BOEDECKER H. Safety risk assessment for UAV operation[C]// Drone Industry Insights, Safe Airspace Integration Project. [S.l.: s.n.], 2015: 12-21.
- [23] 柳永波, 马庆林. 通用飞机改型无人机系统的适航审定基础研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(10): 49-54.
LIU Yongbo, MA Qinglin. Research of airworthiness certification basis for unmanned aircraft system modified from general aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(10): 49-54. (in Chinese)
- [24] 金伟, 尚勇. 中国无人机安全监管[J]. 科技导报, 2019, 37(14): 66-77.
JIN Wei, SHANG Yong. The safety supervision of unmanned aircraft systems in China[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(14): 66-77. (in Chinese)
- [25] 何鹏. 绿色航空 2050 技术愿景: 全球航空业应对气候变化 2050 路线图报告[N]. 中国航空报, 2021-01-05(6).
HE Peng. Green aviation technology vision 2050: global aviation industry roadmap 2050 to address climate change[N]. China Aviation News, 2021-01-05(6). (in Chinese)
- [26] DELBERT C. World's largest all-electric airplane flies for historic 30 minutes [EB/OL]. (2020-05-29) [2021-11-15]. <https://www.popularmechanics.com/science/a32702802/all-electric-airplane-first-flight-cessna/>.
- [27] Cessna Caravan STC. Magnix working towards all-electric [EB/OL]. [2021-07-20]. <https://www.electrive.com/2020/12/13/magnix-working-towards-all-electric-cessna-caravan-stc/>, 2020. 12. 13.
- [28] 中国民航网. 辽宁通用航空研究院 50Ah 航空动力锂电池系统取得民航局适航审定认证 [EB/OL]. (2021-01-22) [2021-07-20]. <https://www.electrive.com/2020/12/13/magnix-working-towards-all-electric-cessna-caravan-stc/>, 2020. 12. 13. (in Chinese)
CAAC NEWS. Liaoning General Aviation Research Institute 50Ah aviation power lithium battery system has obtained the airworthiness certification of Civil Aviation Administration of China [EB/OL]. (2021-01-22) [2021-07-20]. <https://www.electrive.com/2020/12/13/magnix-working-towards-all-electric-cessna-caravan-stc/>, 2020. 12. 13. (in Chinese)
- [29] Byteclicks. Otto Aviation 公司正式揭幕潜在革命性 Celera 500L 飞机 [EB/OL]. [2021-07-20]. <https://byteclicks.com/6616.html>.
Byteclicks. Otto Aviation officially unveiled the potentially revolutionary Celera 500L aircraft [EB/OL]. [2021-07-20]. <https://byteclicks.com/6616.html>. (in Chinese)
- [30] 威海光威复合材料股份有限公司. 光威复材完整交付 TP500 无人运输机! [EB/OL]. [2021-07-20]. <http://www.gwfc.com/index.php?case=archive&act=show&aid=478>.
GW Compos. GW Compos is delivered to TP500 unmanned conveyor completely! [EB/OL]. [2021-07-20]. <http://www.gwfc.com/index.php?case=archive&act=show&aid=478>. (in Chinese)
- [31] 祝小平. 无人机设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
ZHU Xiaoping. UAV design manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [32] 陶于金, 李沛峰. 无人机系统发展与关键技术综述[J]. 航空制造技术, 2014(20): 34-39.
TAO Yujin, LI Peifeng. Development and key technology of UAV[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(20): 34-39. (in Chinese)
- [33] 朱雪耀, 彭永涛, 吕全喜, 等. 货运无人机飞行控制与管理系统 [EB/OL]. (2020-08-12) [2021-07-20]. <http://cnki.scstl.org/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SNAD000001856595&dbcode=SNAD&dbname=SNAD>.
ZHU Xueyao, PENG Yongtao, LYU Quanxi, et al. Flight control and management system of cargo UAV [EB/OL]. (2020-08-12) [2021-07-20]. <http://cnki.scstl.org/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SNAD000001856595&dbcode=SNAD&dbname=SNAD>. (in Chinese)
- [34] 腾讯网. 马斯克的“星链”: 即将干翻传统电信运营商 [EB/OL]. (2020-08-08) [2021-07-20]. <https://page.om.qq.com/page/Ov5owJCXSgXhSE81Ph5mU9mg0>.
Tencent. Musk's "star chain": about to overturn traditional telecom operators [EB/OL]. (2020-08-08) [2021-07-20]. <https://page.om.qq.com/page/Ov5owJCXSgXhSE81Ph5mU9mg0>. (in Chinese)
- [35] SKYGRID. A guide to U-space & the European Drone Rules [EB/OL]. (2020-06-01) [2021-07-20]. <https://www.skygrid.com/blogs/guide-u-space-european-drone-rules/>.
- [36] CESETTI A, FRONTONI E, MANCINI A, et al. A vision-based guidance system for UAV navigation and safe landing using natural landmarks [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2010, 57: 233.

作者简介:

许建华(1984—),男,博士,副研究员。主要研究方向:螺旋桨设计与试验、飞行器气动设计。

李权(1982—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞行器总体气动设计、计算流体力学、无人机系统适航等。

(编辑:马文静)