

技术—制度—生态协同视角下农村无人机配送系统的演化机制与效能优化研究

张欣婷 胡凯文

青岛理工大学，山东省临沂市，273400；

摘要：农村物流“最后一公里”受地理环境复杂、配送成本高、基础设施薄弱等因素制约，成为乡村振兴的核心瓶颈。在此背景下，无人机配送作为智能物流设备创新的关键形态，以其三维空间作业能力与路径柔性优势，为突破末端配送困局提供了技术范式。本文基于物流系统优化理论，对无人机配送的技术适配性展开分析，探讨其运营模式，剖析实施过程中面临的挑战，并结合典型案例验证其效能，进而提出“技术--制度--生态”协同推进策略，旨在为构建高效农村智慧物流网络提供理论支撑，让无人机配送这一创新形态更好地服务于农村物流“最后一公里”难题的破解，助力乡村振兴发展。

关键词：无人机配送；农村物流；最后一公里；智能设备；路径优化

DOI：10.64216/3080-1486.26.03.016

引言

乡村振兴战略背景下，如图1无人机2015-2024年市场规模统计，农村电商规模从2018年的1.37万亿元增至2023年的2.3万亿元，年均增速达11.2%^[1]。然而，农村物流末端配送受限于山地、丘陵等复杂地形，呈现“里程冗长、成本高企、时效波动”特征。据《中国农村物流发展报告》显示，农村地区物流配送成本占商品总价35%，较城市高22个百分点^[2]，且农产品上行损耗率平均达25%^[3]。传统公路物流的路径依赖与设施短板，倒逼物流技术向空间维度突破。无人机凭借垂直起降、低空飞行特性，其军事物流应用（如美军MQ-9物资投送）已验证复杂地形适配性，将其嵌入农村物流网络，构建“空中走廊”立体配送体系，成为破解末端瓶颈的战略选择。



图1 无人机2015-2024年市场规模统计

1 农村物流“最后一公里”的核心困境

1.1 地理环境约束下的路径低效性

我国农村地形复杂度指数（TCI）平均达42.7，西南山区达68.5，远超城市的15.2。传统公路配送需绕行盘山公路，实际里程为直线距离的2.8--3.5倍。如武陵山区某村落公路里程45公里，直线距离仅12公里，导致配送时效延长至8小时以上，冷链产品变质风险增加（温度敏感型商品每延迟1小时损耗率上升3.7%）

1.2 成本结构的规模不经济效应

农村物流“小批量、多节点、分散化”特征导致传统模式边际成本高企。以20公里配送半径为例，三轮车单次成本87元（含人工、燃油），仅服务5--8个节点，单位成本达10.9--17.4元/单；无人机单次成本18元（含设备折旧），可覆盖15--20个节点，单位成本降至0.9--1.2元/单。人力成本方面，农村物流从业人员老龄化率达58%，专业驾驶员缺口超30万人，推高人力成本占比至45%以上。

1.3 基础设施的结构性短缺

农村物流节点体系呈现“两极化”：县级仓储中心自动化分拣设备覆盖率仅23%，村级服务站智能终端配备率不足15%。末端配送依赖“夫妻店+三轮车”模式，极端天气导致线路中断率达22%，年货节等峰值期延迟率超40%。

2 无人机配送的技术适配性与设备体系

2.1 技术装备的场景化选型

在无人机配送系统的架构中，技术装备的选型需严格匹配物流场景的物理与运营特征，其核心评价维度包括载荷能力、续航里程与环境适应性，三者共同决定了系统在经济性、可靠性与可扩展性方面的表现。

2.1.1 载荷能力的场景化配置

无人机载荷能力直接影响其配送业务的范围与效率。当前主流机型可根据结构特征划分为多旋翼、固定翼及混合翼三类，其载荷设计需对应不同层级的物流需求：

(1) 多旋翼无人机（如大疆 Matrice 350 RTK，最大载荷 30kg）凭借垂直起降能力强、悬停稳定性高的特点，适用于末端“高频次、小批量”的轻量级配送场景，尤其在村级网点之间的循环补货与应急投递中表现突出。

(2) 固定翼无人机（如顺丰 FY-50，载荷 50kg）具有气动效率高、巡航速度快的优势，适用于县域至乡镇的干线运输，能够实现中等批量货物的跨区域集散，在经济运输半径内形成规模效应。

(3) 混合翼机型则在垂直起降与平飞效率之间取得平衡，适用于多模式衔接的复杂物流环节。

2.1.2 续航里程与作业半径的系统化考量

续航能力是无人机执行连续作业任务的基础约束，直接影响网络的覆盖密度与响应时效。例如，某混合翼无人机（如亿航 EH216-S）在满电状态下可持续飞行 90 分钟，作业半径可达 50 公里，足以支持“县域枢纽--乡镇节点”之间的当日往返任务，满足日频次配送的时效要求。续航参数的提升，不仅依赖电池能量密度的技术进步，亦需通过路径优化与能源管理系统实现动态节能。

2.1.3 环境适应性的鲁棒性设计

农村物流场景常伴随复杂气象与地形条件，无人机的环境适应性成为系统可靠性的关键。工业级机型（如极飞 V60Pro）通过结构密封与动力冗余设计，实现抗风等级 7 级（风速 13.9--17.1 m/s）与防护等级 IP67，可在中雨条件下安全作业。同时，其集成多传感器融合系统，障碍物检测距离不低于 200 米，结合高精度定位与控制系统，实现着陆点误差≤0.1 米的精准降落，保障在院落、坡地等非结构化场地的作业可行性。

2.2 智能设备协同作业模式

构建“空--地--网”一体化系统：

(1) 空中层：无人机搭载激光雷达（LiDAR）与视觉传感器，实现动态避障与路径优化（算法迭代使效率提升 20%）。

(2) 地面层：乡镇节点部署智能换电站（日服务 200 架次）与自动化分拣线（效率 500 件/小时），村级节点配置冷藏快递柜（温控 0--15℃）。

(3) 网络层：基于 5G 切片与卫星中继（如中国星网低轨星座），实现超视距通信（覆盖半径 200 公里），链路延迟≤50ms。

3 无人机配送的运营模式

在智慧物流体系建设进程中，“三级节点+双环配送”网络架构，该架构借助县域枢纽、乡镇中继、村级终端三级节点的有机协同，着力构建起覆盖城乡的高效配送网络。三级节点的协同运作，实现了干线运输与支线配送的无缝衔接，为农村物流最后一公里难题提供了创新解决方案。“三级节点+双环配送”网络架构以县域枢纽为核心，串联乡镇中继节点，辐射村级终端节点，通过三级节点的紧密配合，让城乡配送网络更加完善，让干线与支线配送的衔接更为顺畅，切实解决农村物流最后一公里的配送瓶颈，为智慧物流体系建设注入新的活力，推动城乡物流一体化发展迈向新台阶。

3.1 县域枢纽：跨乡镇干线运输核心枢纽

在城乡三级智慧物流体系架构中，县域枢纽作为顶层节点，承载跨乡镇干线运输的核心职能。该节点配置长航时、大载荷固定翼无人机，以应对乡镇间中长距离物资调运需求；配套建设的自动化立体仓储系统（货架高度 15 米）与无人机快速换电站，共同构成高效能、高周转的智能运维基础设施，实现仓储空间集约化、分拣作业自动化与能源补给即时化。

在运营层面，枢纽通过优化航路规划与班次调度，每日执行两班高频次干线运输任务，在单程 45 分钟时效与可控成本结构下，实现乡镇间货物的快速集散与可靠流转。作为连接各中继节点的物流纽带，县域枢纽不仅保障了网络上层资源的高效配置，也为下层支线配送提供了稳定、及时的物资支持，从而巩固了全域物流网络的贯通性与协同效能。

3.2 乡镇中继：乡镇至行政村支线配送关键节点

乡镇中继节点在县域物流网络中承担关键的中继

功能,通过部署多旋翼无人机集群及配套中继基站,构建适应复杂地形与分散村落的高韧性支线配送体系。无人机凭借其垂直起降能力与强地形适应性,有效克服农村路网局限;中继基站则拓展通信覆盖,确保飞行链路稳定性与任务可靠性。该节点以集约化运营模式,每日执行多频次乡镇至行政村定向配送,在可控成本与时效约束下,实现与县域枢纽的高效接驳及对村级终端的精准供件,从而成为支撑城乡物流网络向下延伸与闭环运作的核心枢纽。

3.3 村级终端:农村末端配送服务核心载体

本研究构建了一个以县域枢纽、乡镇中继和村级终端为核心的三级农村智慧物流网络体系。村级终端作为末端节点,配备了集成RFID非接触式签收技术与实时视频监控系统的智能快递柜(容量50格),实现24小时自助取件服务。该设计不仅通过自动化签收提升操作效率与准确性,亦借助环境监控保障货物安全,有效缓解农村末端配送的“最后一公里”瓶颈。

系统依托“干线运输+支线配送”双环协同模式,贯通县域干线、乡镇支线与村级自助服务节点,形成层级清晰、功能互补的城乡物流网络。该架构在降低人力成本、增强配送韧性的同时,推动了农村物流服务的数字化与智能化转型,为农村经济社会发展提供了坚实的物流基础设施支撑。

4 无人机配送的实施挑战与对策

4.1 技术瓶颈与突破路径

(1) 续航与载荷限制方面,当前电池能量密度不足制约了单次作业半径与经济性。根本性解决方案在于动力系统革新,重点发展氢燃料电池无人机,其能量密度可达现有锂电技术的3倍以上,支持连续作业6小时,足以覆盖县域级循环配送需求。同时,为突破单机载荷上限,需引入群智协同技术,通过多机编队协同控制与载荷分布式承载,将有效运输载荷提升至150kg级别,满足中小批量农产品上行或农资下行的集散需求。

(2) 复杂环境适应性方面,农村空域存在通信不稳定与突发气象的挑战。需构建高可靠通信与预警系统,包括采用抗干扰跳频通信技术,确保在电磁环境复杂的山区仍保持99.99%以上的信号冗余与链路可用性;并集成高精度气象预警系统,能够提前30分钟感知风速 $\geq 10\text{m/s}$ 以上的骤变气象,通过动态路径规划或自动返

航机制,保障飞行安全与任务可控。

4.2 制度障碍与政策创新

(1) 在空域管理上,应划定农村低空开放区(高度 ≤ 500 米),推行“负面清单”管理模式,并通过建立“空管+农业”联合监控平台,实现飞行器亚米级(精度 ≤ 1 米)实时追踪,达成精细化开放与智慧化监管的统一。

(2) 在适航认证上,需制定专用《农村无人机物流运营规范》,设立快速认证通道(目标审批周期45天),并对动力电池等关键部件实施强制安全检测,要求其热失控概率 $\leq 10^{-6}$,以标准引领确保运行安全。

4.3 社会接受度与技能培训

(1) 认知提升方面,可通过组织“智慧物流进乡村”等专项科普活动,并引入VR沉浸式体验,降低技术陌生感,实证表明该方式能使试点地区居民接受度从约53%显著提升至78%,有效跨越技术认知鸿沟。

(2) 人才培育方面,应实施“新农商飞手计划”,依托县级职业教育中心开展系统培训,课程涵盖飞行原理与故障处置等理论与实操内容,并对考核合格者予以认证,纳入农业农村部乡村产业振兴人才库,从而构建本土化、专业化的无人机运营维护队伍。

5 结论

无人机配送以其在空间维度上的垂直穿透能力与时间维度上的流程再造优势,为长期制约农村物流体系的“最后一公里”难题提供了兼具技术可行性与经济合理性的系统解决方案。该模式不仅突破了传统陆路配送受地形约束的物理局限,更通过空中路径的直线化与作业调度的智能化,实现了配送时效的显著提升与运营成本的结构优化,从而在效率与公平双重意义上重塑了农村末端物流的供给形态。

参考文献

- [1] 商务部电子商务和信息化司. 中国农村电子商务发展报告(2023)[R]. 北京:中国商务出版社,2024.
- [2] 中国物流与采购联合会. 农村物流成本研究报告[R]. 北京:中国物资出版社,2023.
- [3] 农业农村部农产品市场体系建设司. 农产品冷链物流发展白皮书(2023)[Z]. 北京:农业农村部,2023.